«МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА — ВЫЗОВЫ XXI ВЕКА»

VIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС

Москва
Издательский дом «Кодекс»

УДК
ББК

VIII Международный конгресс доменщиков «Металлургия чугуна — вызовы XXI века»

Курунов И.Ф., главный доменщик, ПАО «НЛМК»
Жураковский Б.Л., заслуженный ветеран доменного производства

Янаков И.А., Начальник доменного цеха, ОАО «Саткинский МЗ»

Лазуткин С.Е., 1-й вице-президент, ГК «МетПром»; Лазуткин А.Е., вице-президент по инжинирингу, ГК «МетПром»; Ефремов В.Н., главный инженер, ОАО «Липецкий Гипромез»; Лазуткин С.С., президент, ГК «МетПром»

Набока В.И., начальник технического управления, ПАО «Запорожсталь»

Гугис Н.Н., президент Корпорации «Чермет»

Л.И. Леонтьев, академик НАН РФ;
Мишин Ю.П., вице-президент НП «Русская Сталь»

Курунов И.Ф., главный доменщик, ПАО «НЛМК»;
Карабасов Ю.С., президент, НИТУ «МИСиС»

Третяк А.А., генеральный директор ООО «МСД-КАДП»

Приветственное слово. Л.И. Леонтьев, академик ФГБУ «РАН»

Лазуткин С.С., президент, ГК «МетПром»

Приветственное слово. Карабасов Ю.С., президент,
НИТУ «МИСиС»

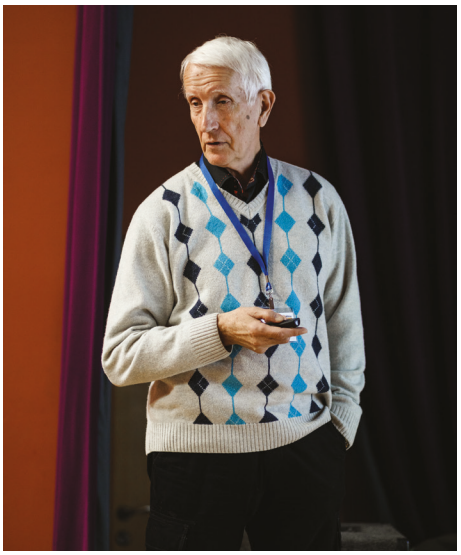
В зале заседаний НИТУ «МИСиС»

Приветственное слово. Гугис Н.Н., президент корпорация «Чермет»

Выступает Мишин Ю.П., вице-президент НП «Русская Сталь»

Выступает Зражевский А.Д., генеральный директор, ОП «Укрметаллургпром»

Выступает Павлов А.В., заместитель главного металлурга, ОАО «ММК»



Выступает Фролов Ю.А., консультант-металлург, ОАО «Уралэлектро»

Выступает Щеглов Э.М., начальник производственно-технического отдела, ОАО «Тулачермет»

Выступает Миронов К.В., начальник доменного цеха, ПАО «Евраз НТМК»

Выступает Лазуткин А.Е., вице-президент по инжинирингу, ГК «МетПром»

Заседание секции «Агломерационное производство»

Выступает Липатников А.В., ведущий специалист ОАО «ММК»

Выступает Рейну Ван Лаар, вице-президент, Danieli Corus

Парeньков А.Е., ведущий эксперт, кафедра «Экстрации и рециклинга чёрных металлов», НИТУ «МИСиС»

Выступает Алымов Г.И., директор, ЧАО «Днепрогидромаш»

Выступает Шевелев Л.Н., научный руководитель по выбросам парниковых газов, ФГУП «ЦНИИЧМ»

Выступает Чернавин А.Ю., заведующий лабораторией доменного производства и металлизации, ОАО «Уральский институт металлов»

Выступает Глазер А.Ю., менеджер по продажам, GEA Bischoff

Сальвадор Кано, глава московского представительства, Paul Wurth

Цыгулёв Ю.И., заместитель директора, ООО «М-Технология»

Выступает Волков Е.А., менеджер по технологии коксо-аглодоменного производства, ПАО «Северсталь»

На секции «Новые технологии» Подгородецкий Г.С., директор НОЦ «Инновационные металлургические технологии», НИТУ «МИСиС»

Выступает Шалимов С.В., глава московского представительства, Sojitz JECT Corporation

Рори Макналли, менеджер по рынку доменных печей, Saint Gobain

Выступает Сарекенов К.З.. профессор кафедры «Нанотехнологий и металлургии», РГП на ПХВ «КарГТУ»

Васильев Л.Е., эксперт, ООО «Метинвест холдинг»
Каримов М.М., начальник цеха производства чугуна, ПАО «Северсталь», ЧерМК

На сессии по новым технологиям. Выступает Подгородецкий Г.С., Директор НОЦ «Инновационные металлургические технологии», НИТУ «МИСиС»

Выступает Мурат С.Г., заместитель директора ООО НПП «Вулкан-ТМ»

Выступает Адамчук А.Н., директор по развитию бизнеса, ГК «МетПром»

Выступает Паршаков В.М., директор, ООО «АКОММ»

Выступает Чэнь Кай, главный представитель в РФ, Ansteel Group Corporation, директор, АО «Металлургический проектный институт провинции Шаньдун»

Гао Чжен Кай, профессор, Пекинский университет наук и технологий

Выступает Гордон Я.М., Руководитель группы Восточной Европы НАСН

Сергатов В.А., заместитель директора, ООО «Фирма Талс-1»; Третяк А.А., генеральный директор, ООО «МСД-КАДП»; Ткач А.Я., главный доменщик ЧАО «Днепрогидромаш»

Герт-Ян Апелдорн, директор по маркетингу и продажам, Danieli Corus;
Шалимов С.В., глава московского представительства, Sojitz JECT Corporation;
Нетронин В.И., советник ПАО «Северсталь», ЧерМК

Ткач А.Я., главный специалист
по аглодоменному производству,
ЧАО «Днепрогидротяжмаш»

На товарищеском ужине в «Галерее художника»

Специалисты Евраз ЗСМК

Участники конгресса от Paul Wurth и Евраз НТМК

Третяк А.А., Генеральный директор ООО «МСД-КАДП»;
Павлов А.В., заместитель главного металлурга, ОАО «ММК»

Лазуткин С.С., президент ГК «МетПром»

Травянов А.Я., директор института экотехнологий и инжиниринга, НИТУ «МИСиС»

Специалисты Paul Wurth

Группа компаний «МетПром» — одна из крупнейших инжиниринговых компаний металлургического сектора России, основанная в 1992 году и динамично развивающая направление реализации проектов на условиях «под ключ», начиная с консалтинга и предпроектных проработок вплоть до пуска объектов в эксплуатацию. Штат компании насчитывает более 900 высококвалифицированных инженеров и специалистов.

В зависимости от стадии реализации, компания предоставляет следующие услуги:

- комплексное исполнение проектов на условиях «под ключ»;
- технический консалтинг;
- предпроектные проработки (обоснование инвестиций, основные технические решения, технико-экономическое обоснование);
- услуги Технического Заказчика;
- инженерные изыскания;
- проектная и рабочая документация;
- прохождение экспертизы проектной документации;
- поставка основного и вспомогательного оборудования;
- строительно-монтажные работы;
- авторский надзор;
- строительный контроль;
- шеф-монтаж и пуск объекта в эксплуатацию

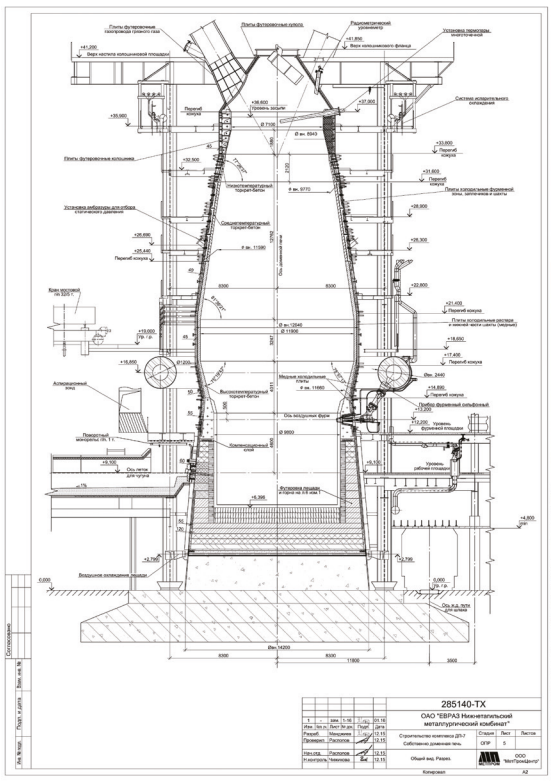
Группа компаний «МетПром» занимает лидирующие позиции в России на рынке реализации проектов в доменном производстве.

Референс-лист ГК «МетПром» в области доменного производства

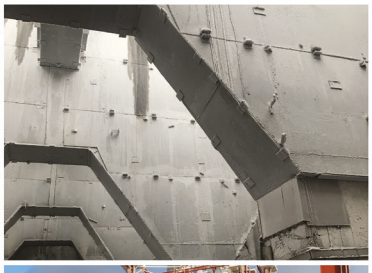
Год окончания проекта	Предприятие	Объект и объемы работ
2018	ЕВРАЗ. Нижнетагильский металлургический комбинат, Россия	Капитальный ремонт 1-го разряда ДП № 7 объемом 2200 м^3 (выплавка ванадиевого чугуна). Генеральное проектирование всех объектов, во всех частях
2015	ArcelorMittal Annaba, Алжир	Капитальный ремонт 1-го разряда ДП № 2 объемом 2000 м^3. Строительно-монтажные работы.
2014	ArcelorMittal Temirtau, Казахстан	Реконструкция ДП № 3 объемом 2700 м^3. Все объекты, КЖ, КМ, ПП, ЭТО.
2014	ArcelorMittal Annaba, Алжир	Капитальный ремонт воздухонагревателей. Строительно-монтажные работы.
2014	ЕВРАЗ. Западно-Сибирский металлургический комбинат, Россия	Установки вдувания пылеугольного топлива в доменные печи. Генеральное проектирование. Все объекты во всех частях.
2013	Исфаханский металлургический комбинат, Иран	Реконструкция ДП № 2 объемом 2000 м^3. Генеральное проектирование всех объектов. Поставка кожуха. Поставка и реконструкция воздуходувки. ПОР и организация монтажа.
2013	ЕВРАЗ. Нижнетагильский металлургический комбинат, Россия	Ленточный конвейер «Сикон» для транспортировки угля. Генеральное проектирование. Поставка и пуск в эксплуатацию.
2013	Исфаханский металлургический комбинат, Иран	Установка колошникового устройства и реконструкция наклонного моста ДП № 2 с изменением его геометрии. Поставка и проект по наклонному мосту.
2013	ЕВРАЗ. Нижнетагильский металлургический комбинат, Россия	Установки вдувания пылеугольного топлива в доменные печи. Генеральное проектирование. Все объекты во всех частях.
2013	Исфаханский металлургический комбинат, Иран	Установка БЗУ на ДП № 2 объемом 2000 м^3. Поставка и проектирование установки БЗУ во всех частях
2012	ArcelorMittal Temirtau, Казахстан	Реконструкция ДП №2 объемом 1700 м^3 и ДП № 3 объемом 2700 м^3. Все объекты, КЖ, КМ, ПП, ЭТО.
2012	Алапаевский металлургический завод, Россия	Автоматизированная система загрузки материалов в ДП №1. Проектирование и поставка, пуск в эксплуатацию
2011	Исфаханский металлургический комбинат, Иран	Реконструкция ДП №1 объемом 1000 м^3 Генеральное проектирование всех объектов. Поставка кожуха. ПОР и организация монтажа.
2010	ЕВРАЗ. Нижнетагильский металлургический комбинат, Россия	Строительство комплекса ПУТ для ДП № 3, ДП № 5 и ДП № 6. Генеральное проектирование. Все объекты во всех частях.
2010	Енакиевский металлургический завод, Украина	Установка БЗУ на ДП № 3. Колошник и газопроводы грязного газа. Проектирование во всех частях.
2009	Северсталь, Россия	Реконструкция комплекса ДП № 3. Генеральное проектирование всех объектов во всех частях.
2009	Чусовской металлургический завод, Россия	Реконструкция ДП № 2 Генеральное проектирование. Все объекты во всех частях.
2009	НЛМК, Россия	Комплекс подготовки и вдувания ПУТ в ДП № 6 и ДП № 7 Генеральное проектирование. Все объекты во всех частях.

Год окончания проекта	Предприятие	Объект и объемы работ
2009	Косогорский металлургический завод, Россия	Капитальный ремонт 1-го разряда ДП №1 Генеральное проектирование. Все объекты во всех частях (без АСУ ТП)
2009	НЛМК, Россия	Строительство ДП №7 Центральный узел. АР, КЖ, КМ ПП, ОВ, ВК.
2008	Металлургический завод «Свободный Сокол», Россия	Капитальный ремонт 1-го разряда ДП № 17 Генеральное проектирование. Все объекты во всех частях.
2008	НЛМК, Россия	Комплекс подготовки и вдувания пылеугольного топлива в ДП № 3, ДП № 4, ДП № 5
2007	Тулачермет, Россия	Капитальный ремонт 1-го разряда ДП № 1. Генеральное проектирование. Все объекты во всех частях.
2006	ЕВРАЗ. Нижнетагильский металлургический комбинат, Россия	Капитальный ремонт 1-го разряда ДП № 5 Генеральное проектирование. Все объекты во всех частях.
2005	Руркельский металлургический завод, Индия	Устройство наклонного моста и скипового подъемника ДП № 3 объемом 2000 м^3 КМ, ТХ
2004	НЛМК, Россия	Капитальный ремонт ДП №5 объемом 3200 м^3. Литейный двор и установка аспирации — во всех частях
2004	Тулачермет, Россия	Капитальный ремонт 1-го разряда ДП № 3. Собственно доменная печь. Насосная ХОВ. Во всех частях.

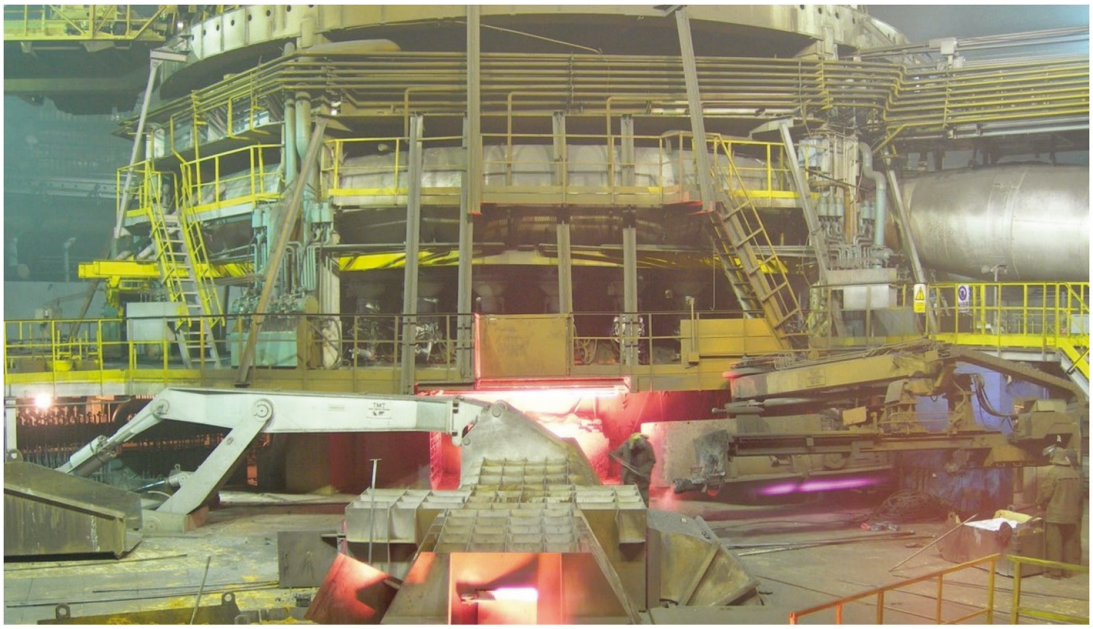
НТМК ДП № 7


285140-ТХ
ОАО "ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат"
Строительство комплекса ДП-7
Собственно доменная печь
Общий вид. Разрез.
ООО "МехПромЦентр"
Копировал
А2

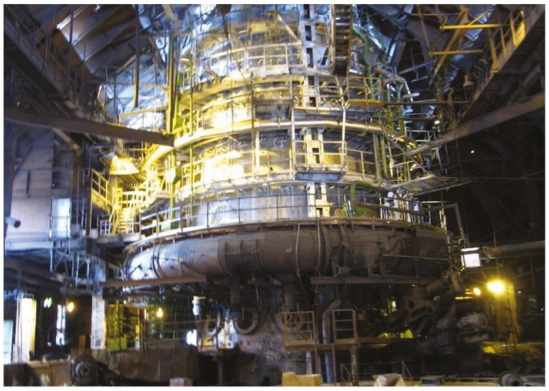
STOP



НТМК ДП № 5



ОСТАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Визит председателя правительства РФ Медведева Д.А. в НИТУ «МИСиС»

История Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» началась почти сто лет назад, когда в 1918 году была создана Московская горная академия, в которой открылось металлургическое отделение. Университет постоянно расширялся, и уже в 1921 году отделения были преобразованы в университеты, а к 1930 году академию разделили на шесть самостоятельных институтов.

Многие выпускники Московской горной академии долгие годы были легендами советской промышленности, как называемыми «стальными наркомами». Так, черную металлургию СССР долгие годы возглавлял Иван Федорович Тевосян, цветной металлургией руководил Петр Фадеевич Ломако, занесенный в Книгу рекордов Гиннеса за самую долгую работу на министерских постах. «Атомный проект» Страны Советов вели к успеху первый ректор МИСиС Авраамий Павлович Завенягин, Ефим Павлович Славский и Василий Семенович Емельянов. Заведующий кафедрой черной металлургии МИСиС, академик Михаил Александрович Павлов в 1920–1930 годах участвовал в проектировании всех крупных металлургических заводов, доменных печей и сталеплавильных агрегатов страны.

Во время Великой отечественной войны советская металлургия была поставлена в тяжелое положение, так как в 1941 году на оккупированной немцами территории стояли заводы, выплавляющие 64,7 % чугуна и более 56 % стали всей страны. Именно в этот момент было очевидно, насколько велика потребность в квалифицированных металлургах, это был практически вопрос выживания всей страны. С началом войны большинство сотрудников и преподавателей университета были мобилизованы на производство, занимались созданием и развитием заводов Урала и Сибири. Несмотря на то, что квалифицированных металлургов не брали на фронт, так как слишком ценны были их знания, многим из них все же пришлось отстаивать свою свободу с оружием в руках.

Осенью 1941 года, после трагической битвы в Вяземском котле, защищать Москву было практически некому, и оставшиеся в столице металлурги сформировали знаменитую «дивизию № 1» — 1-ю Московскую дивизию народного ополчения Ленинского района. В составе этой дивизии на фронт ушли добровольцами сотни студентов и преподавателей МИСиС.

Однако главной задачей МИСиС, даже во время войны, оставалась подготовка квалифицированных кадров, в которых ощущалась острая нехватка. Университет вернули в столицу в самый разгар войны, в апреле 1943 года, и сразу же был сделан большой набор обучающихся — более 800 человек, хотя до войны набиралось около 300. И еще более тысячи студентов были переведены в МИСиС со старших курсов других вузов — так велика была потребность страны в металлургах. Несмотря на все трудности, в том числе необходимость практически заново формировать преподавательский состав, университет справился и начал подготовку кадров для металлургии. Именно за эту самоотверженность 23 февраля 1944 года МИСиС получил свою первую награду — орден Трудового Красного знамени.

После окончания войны подход к подготовке кадров существенно изменился. Раньше МИСиС ориентировался на подготовку специалистов для работы на заводах, а в послевоенные годы внимание сосредоточилось на науке.

В 1948 году в университете открылся физико-химический факультет, готовивших известных «секретных физиков» для исследовательских организаций, атомной и оборонной промышленности. В 1962 году был открыт факультет полупроводниковых материалов и приборов, после чего вуз был переименован в Московский институт стали и сплавов.

В 1960–80 годы во всей стране проходил активный рост и всплеск интереса к точным и естественным наукам. В это время в МИСиС окончательно сформировалась научная школа, которая была, и по сегодняшний день остается одной из лучших в стране, являясь конкурентоспособной как в России, так и во всем мире.

В 2000 году Московский государственный институт стали и сплавов стал Лауреатом премии Правительства РФ в области качества образования.

7 октября 2008 года Указом Президента РФ Дмитрия Медведева МИСиС стал первым российским вузом, получившим статус «Национального исследовательского технологического университета».

В 2013 году университет принял участие в проекте «Программа повышения конкурентоспособности «5-100», по итогам которой пять российских университетов должны войти в сотню лучших вузов мира. Стратегической целью НИТУ «МИСиС», согласно участию в программе проект «5-100», является вхождение и закрепление в числе ведущих мировых университетов по основным международным рейтингам (THE, QS), за счет фундаментальных и прикладных исследований мирового уровня в материаловедении, нано и биотехнологиях, металлургии и горном деле, а также в информационных технологиях. Университет активно разрабатывает и развивает системы многоуровневой подготовки специалистов и научных кадров за счет фундаментальности, качества, непрерывности и преемственности образования и науки, и обязательной интеграции в мировое образовательное и научное сообщество. Для развития системы многоуровневой подготовки специалистов и научных кадров используются фундаментальные и прикладные исследования мирового уровня.

В 2014 году завершилось объединение НИТУ «МИСиС» и Московского горного университета. На сегодняшний день в состав Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» входят три российских и один зарубежный филиал, девять институтов, расположенных в Москве, 50 кафедр и 8 лабораторий.

В 2015 году НИТУ «МИСиС» впервые вошел в международный рейтинг лучших университетов мира Times Higher Education World University Rankings. Среди российских университетов вуз оказался на 9 месте.

В 2016 году университет традиционно стал площадкой для проведения международного доменного конгресса, на котором предоставил доклады о своих новейших разработках и актуальных на сегодняшний день проблемах в металлургии.

Финальный отбор программы «У.М.Н.И.К.»–2016

IV всероссийский форум Breakpoint для студентов и недавних выпускников технических специальностей

Библиотека НИТУ «МИСиС»

Круглый стол с послами Латинской Америки

СОДЕРЖАНИЕ

От организаторов конгресса 8

Раздел 1 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА 9

И.Ф. Курунов, ПАО «НЛМК»
СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛУРГИИ ЖЕЛЕЗА В СВЕТЕ ВЫЗОВОВ 21 ВЕКА 10

А.А. Третяк, ООО «Фирма «ТАЛС-1»
ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО РОССИИ В 2011–2016 ГОДЫ 21

А.Д. Зражевский, ОП «УкрМеталлургпром»
ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО УКРАИНЫ 35

А.Н. Адамчук, ГК «МетПром»
ПРАКТИКА РЕАЛИЗАЦИИ КРУПНЫХ ПРОЕКТОВ В МЕТАЛЛУРГИИ 38

Раздел 2 ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА 42

А.А. Полинов, А.В. Колосов, А.В. Павлов, ПАО «ММК»
О СОСТОЯНИИ И ПЕРСПЕКТИВАХ ПЕРВОГО ПЕРЕДЕЛА ОАО «ММК» 44

В.Д. Осипенко, НПП «ДЭС»
ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРИОРИТЕТНОГО ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ
АГЛО-ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА 48

Е.Н. Виноградов, А.А. Калько, Е.А. Волков, ПАО «Северсталь»
А.С. Нестеров, Н.Г. Иванча, ИЧМ НАН Украины
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С НИЗКИМ ВЫХОДОМ ШЛАКА 51

М.Н. Суворов, «Paul Wurth»
СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ДЛЯ РАБОТЫ С ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ
ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ КАМПАНИИ 59

М.В. Чукин, С.К. Сибагатуллин, А.С. Харченко, Л.Д. Девятченко, МГТУ им. Г.И. Носова
А.А. Полинов, М.А. Семенюк, В.А Бегинюк, ОАО «ММК»
ВЫЯВЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЗАГРУЗКИ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ,
ОСНАЩЕННУЮ КОМПАКТНЫМ БЗУ ЛОТКОВОГО ТИПА 68

И.Э. Шепетовский, Р.И. Нуриев, К.В. Мясников, Е.В. Иванов, Д.А. Набока,
ПАО «Косогорский металлургический завод»
ДОМЕННАЯ ПЛАВКА ВЫСОКОЧИСТОГО ЧУГУНА НА РУДНОЙ ШИХТЕ,
СОДЕРЖАЩЕЙ ДО 100% КИСЛЫХ ОКАТЫШЕЙ 79

В.Н. Титов, Л.С. Ивлева, А.А. Пишикин, ПАО «НЛМК»
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЛКИХ ФРАКЦИЙ АГЛОМЕРАТА И КОКСА В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ РАБОТЫ
ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ 84

А.А. Ткач, В.А. Петренко, А.Я. Ткач, ПАО «Днепрогидромаш»
ВЫПУСК ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ ИЗ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ХОД ПРОЦЕССА.
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ВОПРОСА 91

В.А. Курганов, Д.В. Парамонов, А.В. Федько, ОАО «Черметинформация», ООО «ТОР»
НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ДОМЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЧУГУНОВ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ 97

А.А. Акбердин, А.С. Ким, Р.Б. Султангазиев, ХМИ им. Ж. Абишева
MgO ИЛИ B_2O_3 В ДОМЕННЫХ ШЛАКАХ? 102

И.Г. Товаровский, А.Е. Меркулов, ИЧМ НАН Украины
НОРМАТИВНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ НА РАСХОД КОКСА
И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ 111

Раздел 3 ТЕХНОЛОГИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА 123

А.Е. Лазуткин, ГК «МетПром»
КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЯ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ. ТЕНДЕНЦИИ И РАЗВИТИЕ 124

А.С. Нестеров, Ю.С. Семенов, В.В. Горупаха, ИЧМ НАН Украины
А.М. Кузнецов, А.Г. Коваленко, А.В. Зубенко, ЧАО «ЕнМЗ»
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЖИДКИХ ФАЗ ПРИ ВДУВАНИИ ПУТ
В ПЕРЕМЕННЫХ ШИХТОВЫХ УСЛОВИЯХ 133

Е.С. Попов, А.В. Сущенко, Л.Е. Васильев, ООО «МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ»
М.А. Томаш, ЧАО «ММК им. Ильича»
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПУТ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 138

В. В. Филиппов, В. А. Михалёв, К. В. Миронов, А. А. Форшев, АО «ЕВРАЗ НТМК»
Б.С. Тлеугабулов, С.А. Загайнов, Уральский ФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина
РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ВАНАДИЕВОГО ЧУГУНА С ПРИМЕНЕНИЕМ
ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА 146

В.И. Набока, ПАО «Запорожсталь»
ВЛИЯНИЕ ФУТЕРОВКИ И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ШАХТЫ НА РАСХОД КОКСА И РЕСУРС РАБОТЫ
ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ» ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА 153

А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, ИЧМ НАН Украины
ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В УКРАИНЕ 163

А.Д. Зражевский., В.Н. Захарченко, ОП «Укрметаллургпром»
ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВДУВАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА
В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ УКРАИНЫ 173

Раздел 4 ОБОРУДОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИИ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ 176

Рейнуд Ван Лаар, Виктор Ван Страатен, «Danieli Corus»
СОВРЕМЕННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ — МОДУЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО 178

В.Н. Панин, ГП «Укргипромез»
ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ДП № 4 МЕТКОМБИНАТА «ЗАПОРОЖСТАЛЬ» 190

Г.И. Алымов, ЧАО «Днепрогидромаш»
КОМПАНИЯ «ДНЕПРОГИДРОМАШ» — 20 ЛЕТ РАБОТАЕТ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГОВ 199

Э.А. Вислогузова, Л. Фолько, Р.А. Чеглов, Д. Палмизано, «Seven Refractories»
ВИДЕНИЕ ОГНЕУПОРНОЙ ФУТЕРОВКИ В ЗАПЛЕЧИКАХ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ 208

Е. А. Кондратьев, В. В. Горбунов, Богдановичское ОАО «Огнеупоры»
ПРОДУКЦИЯ БОГДАНОВИЧСКОГО ОАО «ОГНЕУПОРЫ» ДЛЯ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА 211

А.Ю. Глазер, ООО «ГЕА Процессный инжиниринг»
ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ GEA ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА ПРОМЫШЛЕННЫМИ ВЫБРОСАМИ
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ 215

Ю.И. Цыгулев, ООО «Технология–М»
СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИИ ВДУВАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА 220

М.Е. Аксюшин, М.Э. Калугин, Э.Н. Рябов, ЗАО «Калугин»
СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ
ДОМЕННЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ 228

Петер Клут, Вутер Эвальтс, Робин Хинк, Эдо Энгель, «Danieli Corus»
ПОСЛЕДНИЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИИ СУХОЙ И МОКРОЙ ОЧИСТКИ ДОМЕННОГО ГАЗА 236

Бумади Наджи, Руле Фредерик, Алэн Журдан, Мурье Миколе, Рори Макналли, «Saint Gobain»
КЕРАМИЧЕСКИЙ СТАКАН SAINT GOBAIN: ОБНОВЛЕНИЕ 244

Макото Гото, «Nippon Steel & Sumikin Engineering»
ДОЛГОВЕЧНЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ МЕДНЫЕ ХОЛОДИЛЬНИКИ, РАЗРАБОТАННЫЕ
НИППОН СТИЛ И СУМИКИН ИНЖИНИРИНГ 257

Л.А. Вайсберг, А.Н. Коровников, В.А. Трофимов, ЗАО НПК «Механобр-техника»
МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМ ШИХТОПОДАЧИ ДОМЕННЫХ ЦЕХОВ 265

Юй Гохуа, Чжан Сянго, Ван бин, «Ansteel Group Corporation»
ИННОВАЦИЯ И ПРАКТИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ № 3 ОБЪЕМОМ 3200 М^3
ПАО «ЛАЙУСКАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ КОРПОРАЦИЯ» 270

Раздел 5 АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 280

А.П. Уланов, ООО «ВНИПИ САУ-20», В.М. Паршаков, ООО «АКОММ», А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ В СНГ АСУ ТП ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОДЕРЖАНИЯ 282

В.В. Кочура, С.Л. Ярошевский, В.И. Купенко, ДонНТУ
КОНТРОЛЬ СТЕПЕНИ СГОРАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ
ПО АНАЛИЗУ ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ 294

А.А. Третяк, ООО «ТАЛС-1», В.М. Паршаков, В.А. Борисенко, ООО «АКОММ»,
М.В. Чемикосов, ООО «Аэротранс», А.П. Уланов, ООО «ВНИПИ САУ – 20»
ДОСТОВЕРНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ГАЗОВОГО ПОТОКА ПО РАДИУСУ КОЛОШНИКА
ДОМЕННОЙ ПЕЧИ, ПОЛУЧАЕМОЙ РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ ИЗМЕРЕНИЙ 302

В.М. Паршаков, ООО «АКОММ», А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
А.А. Полинов, А.В. Павлов, И.Е. Прохоров, А.В. Колосов, П.Ю. Довженко, ОАО «ММК»
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ЗА СЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЫШЕНИЯ
АСУ ТП ДОМЕННОЙ ПЕЧИ (НА ПРИМЕРЕ ВНЕДРЕНИЯ НА ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ ОАО «ММК») 309

В.М. Паршаков, ООО «АКОММ», А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
А.А. Полинов, А.В. Павлов, И.Е. Прохоров, А.В. Колосов, П.Ю. Довженко, ОАО «ММК»
НЕПРЕРЫВНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ, КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДВУМЕРНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ПРОЦЕССЫ
ПО ВЫСОТЕ И СЕЧЕНИЮ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ОТ УРОВНЯ ЗАСЫПИ ДО ЧУГУННОЙ ЛЁТКИ 328

Дитер Беттингер, «Primetals Technologies»
КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ АГЛОДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА 342

С.А. Денисов, ООО «КОНВЕЛС Автоматизация»
СИСТЕМА ELMAN ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЕМ ПОДАЧ И РЕЖИМОМ ДУТЬЯ ПУТ
ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ХОДА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПОТОЧНОГО АНАЛИЗА
ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА 350

П.П. Богданов, ООО «Конвелс Автоматизация»
БЕСКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА КОНТУРОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ
ПАССИВНОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ 356

Б.А. Марсуверский, ООО «НПО» Санкт-Петербургская Электротехническая Компания»
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ НА ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ АСУ ПО ИНФОРМАЦИИ
ОБ АКТИВНОМ ВЕСЕ ШИХТЫ 363

Н.Г. Иванча, И.Г. Муравьева, А.С. Нестеров, Ю.С. Семенов, Е.И. Шумельчик, ИЧМ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ, РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ДОМЕННОЙ ПЛАВКОЙ 366

А.И. Лаврухин, Л.Д.Хинский, ОАО «Облпромавтоматика»
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ЛОТКА БЗУ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ УРОВНЯ ЗАСЫПИ ШИХТЫ НА КОЛОШНИКЕ ДП № 5 ЧЕРЕПОВЕЦКОГО МЕТКОМБИНАТА ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ» 377

А.В. Липатников, Д.А. Шнайдер, А.А. Полинов, А.В. Колосов, Е.Н. Степанов, М.А. Цыгалов, А.Е. Степанова, Е.В. Астратова, ОАО «ММК»
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИВОЗА И ПОТРЕБЛЕНИЯ УГОЛЬНОГО И ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ В АГЛО-КОКСО-ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВАХ ОАО «ММК» НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ..... 381

Д.А. Шнайдер, А.А. Полинов, А.В. Колосов, А.В. Павлов, И.Е. Прохоров, ОАО «ММК»
Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, О.В. Колесникова, А.А. Басалаев, ЮУрГУ
МОДЕЛЬНО-УПРЕЖДАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ СОСТОЯНИЕМ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ НА ОСНОВЕ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ЭФФЕКТИВНОЙ МНОГОМЕРНОЙ ОБЛАСТИ..... 392

Раздел 6 ПОДГОТОВКА ДОМЕННОЙ ШИХТЫ..... 404

Ю.А. Фролов, ОАО «Уралэлектро»
СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА АГЛОМЕРАТА 406

Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, НИТУ «МИСиС»
А.Н. Шаповалов, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»
НОВЫЙ ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ДОБАВОК В АГЛОМЕРАЦИОННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ..... 433

Д.Р. Ганин, А.А. Панычев, А.Н. Шаповалов, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»
В.Г. Дружков, МГТУ
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА ВВЕДЕНИЕМ В ШИХТУ ДОБАВОК-АКТИВАТОРОВ В ВИДЕ ПУЛЬПЫ В ПРОЦЕССЕ ОКОМКОВАНИЯ 439

В.А. Сергатов, В.М. Давидченко, ООО «Фирма Системосервис»
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
ГОРЕЛКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В АГЛО-ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 448

А.Н. Симоненко, ООО «Интер-С Груп»
ТЯГОДУТЬЕВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ..... 463

А.А. Шульга, ПАО «ЕВРАЗ ДНКХЗ»
МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И УСЛОВИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В УСЛОВИЯХ МЕЖБАССЕЙНОВОЙ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ПАО «ЕВРАЗ ДНКХЗ» 466

А.В. Козуб, А.И. Панченко, АО «МГОК», Н.Т. Эфендиев, Р.И. Исмагилов, УК «Металлоинвест»
А.А. Солодухин, В.А. Горбачев, ООО «НПВП ТОРЭКС», Ю.А. Чесноков, УрО РАН
УПРАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ КАК ОСНОВА СТРАТЕГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА 476

А.А. Елисеев, Т.В. Деткова, В.Ю. Кучин, ПАО «Северсталь»
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ГОРЯЧЕЙ ПРОЧНОСТИ АГЛОМЕРАТОВ РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА..... 484

Т.Я. Малышева, В.Б. Горбунов, Г.С. Подгородецкий, С.А. Писарев, НИТУ «МИСиС»
РОЛЬ ЖЕЛЕЗА МАГНЕТИТА В АГЛОМЕРАЦИИ КАК РАЗВИТИЕ ГЕОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРОЦЕССЕ..... 490

В.А. Кобелев, М.В. Мамаев, Д.Ю. Дунцев, ООО «Проминтех-НКА»,
И.П. Беликов, ООО «Башминералресурс», Г.А. Нечкин, ОАО «Уральский институт металлов»
ПРИМЕНЕНИЕ МАРГАНЦЕВОГО ИЗВЕСТНЯКА В КАЧЕСТВЕ ФЛЮСУЮЩЕЙ ДОБАВКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОКАТЫШЕЙ..... 493

Г.Г. Валявин, Л.А. Смирнов, А.Ю. Чернавин, ОАО «Уральский институт металлов»
М.И. Стуков, М.В. Мамаев, ООО «Проминтех»
ПЕРСПЕКТИВЫ КОКСОДОМЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕФТЕУГОЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ..... 498

Д.А. Чернавин, А.Ю. Чернавин, ОАО «Уральский институт металлов»
М.И. Стуков, ООО «Проминтех-НКА», М.В Зорин, УрФУ им. Б.Н. Ельцина
РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВА ДОМЕННОЙ ШИХТЫ С КОКСОВЫМИ НАСАДКАМИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ДОЛЕ В НИХ НЕФТЕУГЛЕРОДА 506

Раздел 7 НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА 513

Н.А. Заикин, Н.В. Шабля, Г.С. Подгородецкий, В.Б Горбунов, НИТУ «МИСиС»
РАЗРАБОТКА ПИЛОТНОГО ОБРАЗЦА УНИВЕРСАЛЬНОГО РЕАКТОРА БАРБОТАЖНОГО ТИПА 514

Г.С. Подгородецкий, В.Б. Горбунов, Л.А. Полулях, НИТУ «МИСиС»
А.А. Третьяк, ООО «Фирма ТАЛС»
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИТОПЛИВНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА В ПРАКТИКЕ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ЦЕХОВ 519

Н.А. Заикин, Н.В. Шабля, НИТУ «МИСиС»
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОВАРНОГО ФЕРРОНИКЕЛЯ ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ, ВЫПЛАВЛЕННЫХ ИЗ ОКИСЛЕННЫХНИКЕЛЕВЫХ РУД ЮЖНОГО УРАЛА 527

Г.С. Подгородецкий, В.Б. Горбунов, Н.А. Заикин, Н.В. Шабля, НИТУ «МИСиС»
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕГИРОВАННОГО ЧУГУНА ИЗ ОКИСЛЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ РУД ЮЖНОГО УРАЛА 531

К.И. Смирнов, ЮУрГУ
РАЗДЕЛЕНИЕ ИЛЬМЕНИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА НА ЖЕЛЕЗО И ДИОКСИД ТИТАНА ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ 535

В.Е. Рощин, ЮУрГУ
ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ КОМПЛЕКСНЫХ РУД С ПОЛУЧЕНИЕМ ПЕРВОРОДНОГО ЖЕЛЕЗА И ОКСИДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ТИТАНА И МАГНИЯ 539

Л.Н. Шевелев, ЦНИИЧермет
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 546

Раздел 8 ПОДГОТОВКА КАДРОВ И ИСТОРИЯ МЕТАЛЛУРГИИ 555

А.М. Газалиев, К.З. Сарекенов, Р.Б. Султангазиев, КарГТУ
А.А. Акбердин, ХМИ им. Ж. Абишева
КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОЦЕССОМ 556

С.С. Квон, А.З. Исагулов, В.Ю. Куликов, КарГТУ
ОПЫТ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ «МЕТАЛЛУРГИЯ» В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ ИНДУСТРИАЛИЗАЦИИ 589

В.Ю. Куликов, С.С. Квон, КарГТУ
ПОДГОТОВКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ КАДРОВ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ. ФАКТОР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГПИИР-2 593

А.Е. Лазуткин, С.Е. Лазуткин, ГК «МетПром», А.А. Третяк, ООО «Фирма «ТАЛС-1»
ЗАСЛУЖЕННЫЕ ДОМЕНЩИКИ 596

Рекомендации VIII Международного доменного конгресса «Металлургия чугуна — вызовы XXI века» (Третяк А.А.) 606

Приложение 1 АЛФАВИТНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ПРЕДПРИЯТИЙ, КОМПАНИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ — УЧАСТНИКОВ КОНГРЕССА 610

Приложение 2 АЛФАВИТНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ УЧАСТНИКОВ КОНГРЕССА 614

ОТ ОРГАНИЗАТОРОВ VIII МЕЖДУНАРОДНОГО КОНГРЕССА

УВАЖАЕМЫЕ ДАМЫ И ГОСПОДА!

Специалисты коксо-агло-доменного производства регулярно проводят конгрессы, на которых встречаются руководители, металлурги, ученые объединений, предприятий, научных и проектных институтов, центров и учебных ВУЗов. Конгресс доменщиков, проходивший в 2010 году в стенах НИТУ «МИСиС» возобновил былые традиции встреч специалистов одной из древнейшей профессии — металлургов первого передела. Для проведения нынешнего VIII Международного конгресса «Металлургия чугуна — вызовы XXI века» была создана организационный комитет.

Основные участники оргкомитета:

- Группа компаний «МетПром»
- НИТУ «Московский институт стали и сплавов»
- Корпорация «Чермет»
- НП «Русская Сталь»
- ОАО «Черметинформация».

Генеральным спонсором Конгресса выступила Группа компаний «МетПром».

Организационный комитет провел большую работу по подготовке и проведению конгресса. В профессиональном общении и неформальных встречах принимало участие 230 руководителей, специалистов металлургической отрасли от 15 металлургических предприятий России и Украины; зарубежных компаний Германии, Люксембурга, Китая, Японии, Канады, Великобритании; научных и проектных институтов, центров; учебных ВУЗов России, Казахстана.

VIII Международный конгресс доменщиков прошел с широким обсуждением вопросов агломерационных процессов и теории доменной плавки; современного оборудования и новых видов огнеупорных материалов в условиях использования технологии с вдуванием пылеугольного топлива. После рассмотрения на 8 сессиях вопросов первого передела, специалисты посетили Международную выставку «Металл Экспо» на ВДНХ.

В принятых решениях участники выразили благодарность Генеральному спонсору ГК «МетПром» за отличную организацию в проведении VIII Международного конгресса доменщиков; подтвердили необходимость регистрации Международного Союза Доменщиков и проведении очередного Конгресса доменщиков в 2018 году.

Раздел I
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

И.Ф. Курунов, ПАО «НЛМК»
СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛУРГИИ ЖЕЛЕЗА
В СВЕТЕ ВЫЗОВОВ 21 ВЕКА 10

А.А. Третяк, ООО «Фирма «ТАЛС-1»
ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО РОССИИ В 2011–2016 ГОДЫ 21

А.Д. Зражевский, ОП «УкрМеталлургпром»
ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО УКРАИНЫ 35

А.Н. Адамчук, ГК «МетПром»
ПРАКТИКА РЕАЛИЗАЦИИ КРУПНЫХ ПРОЕКТОВ В МЕТАЛЛУРГИИ 38

И.Ф. Курунов, ПАО «НЛМК»

СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛУРГИИ ЖЕЛЕЗА В МИРЕ В СВЕТЕ ВЫЗОВОВ 21 ВЕКА

Представлен краткий анализ состояния техники и технологии производственных процессов выплавки чугуна и прямого получения железа, а также прогнозная оценка перспектив развития этих технологий с учетом достигнутого уровня их эффективности и возрастающих требований к металлургам по снижению эмиссии CO2 в свете соглашения о мерах по уменьшению изменения климата, подписанного на состоявшейся в 2015 году Конференции ООН по изменению климата. Анализ выполнен по материалам 7-го Международного конгресса по агло-коксо-доменному производству (3-7 мая 2015 г. Кливленд, США) и 7-го Европейского конгресса по агло-коксо-доменному производству (12-13 сентября 2016 г. Линц, Австрия).

ВВЕДЕНИЕ

Мировое производство стали в 2014 году достигло максимального за последние годы уровня — 1,665 млрд. т [1], из которых 73,9% выплавлено в кислородных конвертерах (КК), 25,6% — в электропечах и 0,5% — в мартеновских печах (рис. 1). В составе металлошихты для выплавки всей стали доменный чугун составил 63,8%, скрап — 31,7%, металлизованные окатыши и ГБЖ — 4,1% и чугун, выплавленный в процессах COREX и MIDREX — только 0,4%. Почти половина (49,4%) мирового производства стали в 2014 году приходилась на долю Китая. В связи с ростом производства стали и чугуна в Китае в последние годы доля конвертерной стали увеличилась, как и доля чугуна в металлошихте для ее производства.

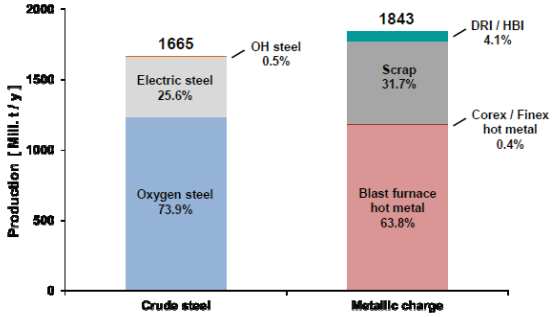


Рис.1. Мировое производство стали и состав металлошихты для ее выплавки в 2014 году [1]

Старейший и самый эффективный металлургический агрегат — доменная печь (ДП) по-прежнему является основным производителем чугуна. Альтернативные процессы выплавки чугуна в агрегатах FINEX и COREX и другие жидкофазные процессы не имеют глобальной перспективы, хотя в локальных условиях отдельных предприятий применение таких агрегатов совместно с ДП может быть экономически целесообразным и обеспечивать снижение эмиссии парниковых газов [2–4].

Таким образом, технологическая схема ДП-КК играет ведущую роль в производстве стали и, по прогнозам, сохранит ее в течение ближайших нескольких десятилетий, а затем, по мере накопления металлофонда и увеличения производства металлизованных окатышей и ГБЖ, доля стали, выплавляемой электропечах из скрапа и ГБЖ, будет постепенно увеличиваться и занимать более значимую роль в мировой выплавке стали (Рис. 2) [5]. Тем не менее, классическая технологическая схема ДП–КК еще многие десятилетия будет сохранять высокую значимость, а доменный процесс будет оставаться основным процессом выплавки чугуна из железорудных материалов.

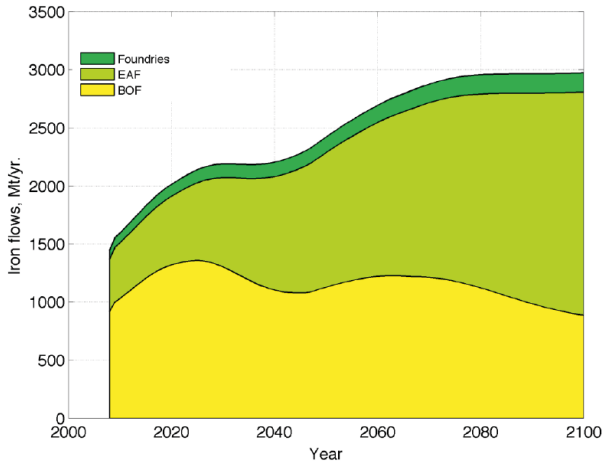
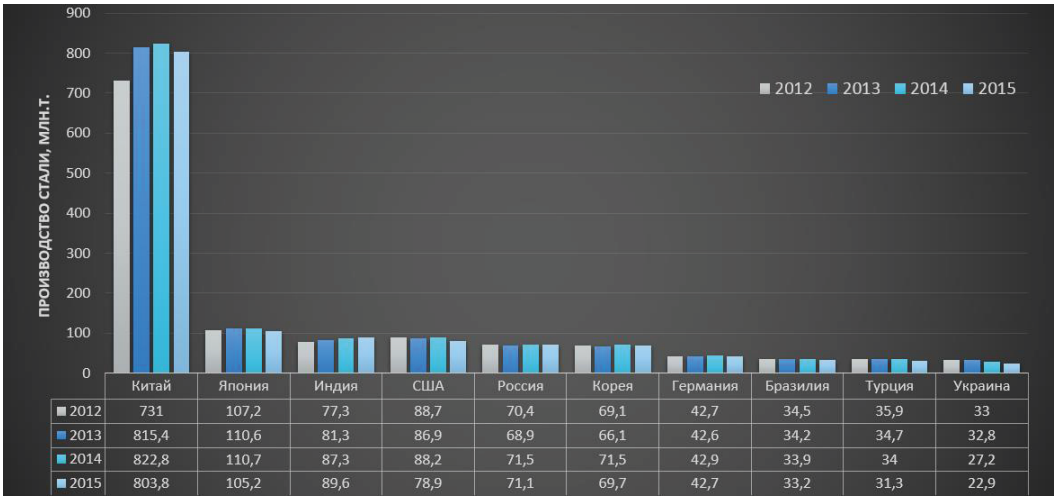


Рис. 2. Прогноз динамики структуры производства стали

Мировое производство чугуна и стали за последние 25 лет выросло более, чем вдвое, в основном, за счет увеличения их выплавки в Китае, где в 2015 году масса выплавленной стали составила более половины ее производства в 10 странах — основных производителей стали (рис. 3) [6].



	Китай	Япония	Индия	США	Россия	Корея	Германия	Бразилия	Турция	Украина
2012	731	107,2	77,3	88,7	70,4	69,1	42,7	34,5	35,9	33
2013	815,4	110,6	81,3	86,9	68,9	66,1	42,6	34,2	34,7	32,8
2014	822,8	110,7	87,3	88,2	71,5	71,5	42,9	33,9	34	27,2
2015	803,8	105,2	89,6	78,9	71,1	69,7	42,7	33,2	31,3	22,9

Рис. 3. Производство стали в 2012-2015 годах в 10 топ странах

Стремительный рост (Рис. 4) производства стали (со 120 до 800 млн. т,) в Китае, стимулируемый ростом ее потребления стали и ростом ВВП, произошел за последние 15 лет. (Рис. 5) [6].

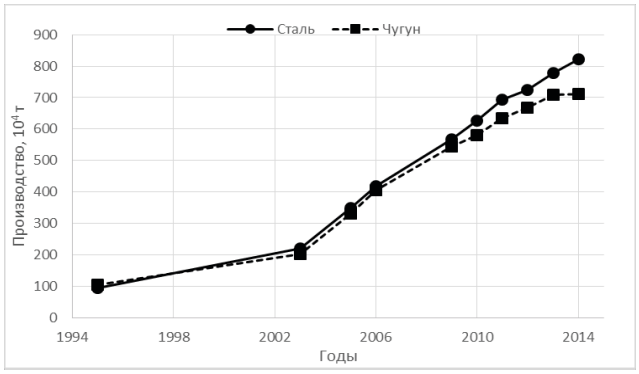


Рис. 4. Динамика производства чугуна и стали в Китае в период 1994-2014 гг.

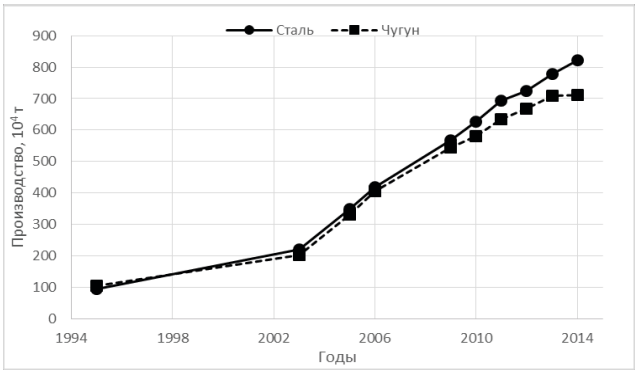


Рис. 5. Динамика ВВП, производства и внутреннего потребления стали в Китае в 2005-2014 гг .

По числу мощных ДП объемом более 5000 м^3 (9 ДП) Китай занимает 2-е место в мире (рис. 6) после Японии (15 ДП). Парк ДП в Китае насчитывает около 400 агрегатов, из которых 34 ДП имеют объем 4500–5800 м^3, но большинство ДП имеет объем до 1000 м^3 [7]. На крупных металлургических заводах Китая, расположенных в основном на побережье, ДП работают на коксе с горячей прочностью (CSR) не менее 65%, средний расход которого в 2014 г составлял 360–365 кг/т при среднем расходе вдуваемого ПУТ 150 кг/т.[8].

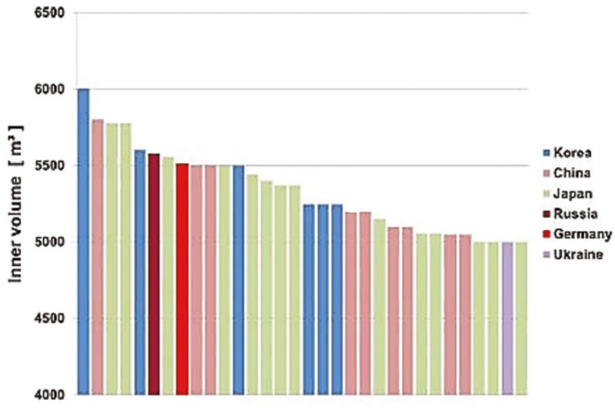


Рис. 6. 32 крупнейших ДП в мире (объемом 5000 м^3 и более)

В Японии, в отличие от Китая, из 28 работающих ДП только две ДП имеют объем менее 2000 м^3, а половина ДП имеет объем более 5000 м^3. (Рис.7)[7].

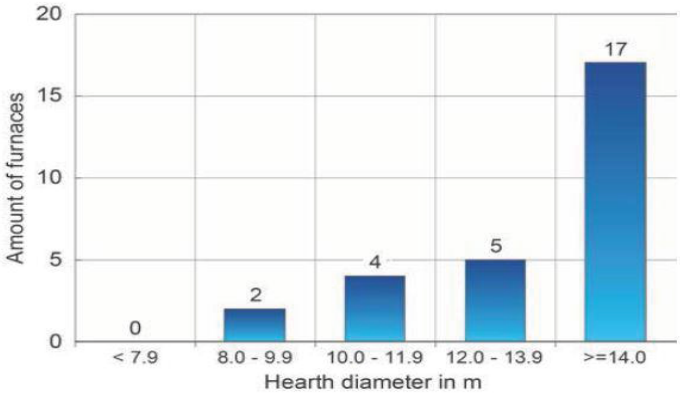


Рис.7. Доменные печи в Японии

ДП Японии работают на агломерате, окатышах и коксе, производимых из привозного сырья. В течение уже многих лет в Японии проводятся исследования по производству самовосстанавливающихся углеродсодержащих компонентов доменной шихты (окатыши и брикеты). Проведены успешные опытные плавки с применением безобжиговых углеродсодержащих окатышей в ДП объемом более 5000 м^3 [9]. Высокое качество производимого кокса (CSR >65%) обеспечивается не только марочным составом углей, но и эффективными технологиями подготовки угольной шихты к спеканию, включая ее подогрев, сушку, грануляцию и брикетирование мелких фракций угля. Реализуемая в Японии Программа по повышению качества кокса, железорудных компонентов шихты и технологии доменной плавки нацелена на достижение среднего по всем ДП суммарного расхода топлива в коксовом эквиваленте 450 кг/т. Внутреннее потребление и производство стали в Японии в последние 10 лет стабилизировалось на уровне 80-85 и 105-110 млн.т., соответственно [6].

Развитие черной металлургии в Южной Корее началось в конце 60-х годов с помощью Японии. В 70-х-90-х годах фирмой POSCO построены заводы в Поханге (12 млн.т) и Гванъянге (15 млн.т), а в период 2007–2010 годы компания Hundai Steel построила завод в Дангджине. Все заводы построены на морском побережье. К 2013 году годовое производство стали в Южной Корее выросло до 70 млн. т. [10]. Отличительной особенностью развития металлургии в Южной Корее является ее стремительный рост, ориентация на внешний рынок как по сырью, так и по производимой продукции, применение для выплавки чугуна только мощных ДП (рис. 8), а также агрегатов FINEX, на долю которых приходится около 9% всего выплавляемого в Южной Корее чугуна (Таблица 1).

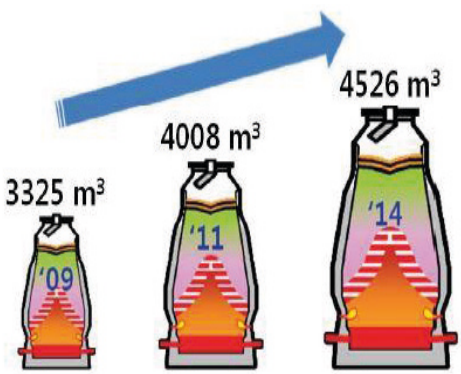


Рис. 8. Рост среднего объема ДП в Южной Корее

В Южной Корее работает самая крупная в мире ДП объемом 6000 м³ с диаметром горна 16,1 м. Производство чугуна и стали в стране сосредоточены в 2-х металлургических компаниях POSCO и Hyundai Steel (Таблицы 1 и 2). Все ДП и агрегаты FINEX работают с вдуванием ПУТ. Кокс, используемый в ДП, имеет горячую прочность (CSR) более 65%.

Таблица 1. Характеристика ДП и агрегатов FINEX в Pohang.

Характеристики	ДП-1	ДП-2	ДП-3	ДП-4	FINEX-1	FINEX-2
Рабочий объем, м³	1660	2550	4350	5600	1500	2000
Диаметр горна, м	9,2	11	14	15,6	8,9	11,5
Число фурм	24	28	38	42	28	40
Число леток	2	2	4	4	2	2
Расход ПУТ, кг/т	150	150	250	200	220	160

Таблица 2. Характеристика ДП в Gwangyang и Dangjin.

Характеристики печей	POSCO					HUNDAI STEEL
	ДП-1	ДП-2	ДП-3	ДП-4	Дп-5	№ 1,2,3
Рабочий объем, м³	6000	4350	4600	5500	3950	5250
Диаметр горна, м	16,1	14	14,3	15,6	13,2	14,8
Число фурм	44	38	40	42	36	42
Число леток	4	4	4	4	4	4
Расход ПУТ, кг/т	160	200	200	250	200	180

В 11 странах Западной Европы в 2014 году работало 45 ДП, из которых только 10 имели объем 3000 м³ и более, а самая мощная ДП (ДП № 2 в Швельгерне) имеет диаметр горна 14,9 м (Рис. 9). За последние 25 лет число ДП в Западной Европе сократилось более, чем в два раза, производство чугуна снизилось с 94 до 77 млн. в год, а средняя годовая производительность ДП повысилась с 1 млн.т до 1,7 млн. т [7]. Большинство ДП в Западной Европе работают на агломерате, окатышах и руде (5–20%). 3 ДП работают на шихте из 95-98% агломерата, а ДП Финляндии и Швеции на окатышах и брикетах (до 10% в шихте) из металлургических отходов. Производство кокса в Западной Европе за последние 25 лет снизилось с 60 до 25 млн.т, а его потребление — с 43 млн.т. до 28 млн.т, Производимый кокс в 2013 году имел характеристики: CSR > 65%, CRI < 23%, I40 >57%, I10 <18%, зола < 9%, S < 0,7%. Гранулометрия производимого кокса: <10 мм — до 3% , < 40 мм — до 18% , > 80 мм до 10%. Средний расход кокса в Германии в 2013 г. составлял 330 кг/т при среднем расходе ПУТ 230 кг/т. После пуска в 2014 и в 2015 годах в Линце, Зальцгиттере и в Раахе систем подготовки и вдувания ПУТ мазут и природный газ в ДП Западной Европы больше не вдувают [7].

В 2014 году в 5-ти металлургических компаниях Северной Америки работало 29 ДП, которые произвели 42 млн.т чугуна. 19 ДП имеют объем от 925 до 1800 м³ и только 10 ДП — более 2000 м³. Объем двух самых крупных ДП Северной Америки равен 3244 и 4164 м³ [11]. Шихта более половины ДП на 100% состоит из окатышей. Агломерат применяется в шихте только в 10 ДП. Практически на всех ДП Северной Америки вдувают по 2-3 вида топлива (ПУТ, ПГ, КГ). При этом расход кокса на ДП составляет 350-500 кг/т, а расход вдуваемого топлива в коксовом эквиваленте варьирует от 30 до 210 кг/т. Применяемый кокс имеет горячую прочность (CSR) от 60 до 70%. Большинство ДП Северной Америки имели умеренную производительность (от 2,0 до 2,7 т/м³ в сутки) и только 4 ДП, работающие на 100% смеси офлюсованных и неофлюсованных окатышей и с применением в шихте скрапа и ГБЖ, имели производительность от 3,0 до 3,8 т/м³ в сутки [11].

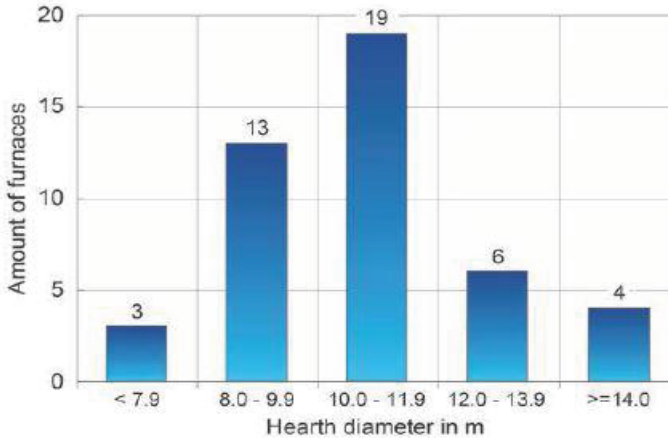


Рис. 9. Доменные печи в Западной Европе

В странах Южной Америки в 2014 году произведено 41874 тыс. т стали, из которых 74,7% выплавлено в Бразилии. Средние значения расхода кокса и ПУТ по 7 заводам Бразилии составляли в 2014 году 391 кг/т и 124 кг/т. Горячая прочность кокса (CSR), применяемого в Бразилии составляет 66–68% [12].

ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА И СТАЛИ

Благодаря многоплановым усилиям металлургов и конструкторов по совершенствованию технологии доменной плавки, конструкции ДП и увеличению их объема расход энергии на выплавку чугуна в ДП за последние 250 лет сократился с 300 ГДж/т до 20 ГДж/т, а на отдельных ДП он достигает 15 ГДж/т [8]. По оценке ведущих специалистов Германии эффективность доменного процесса в настоящее время на многих ДП приблизилась к термодинамическому пределу. (Рис. 10).

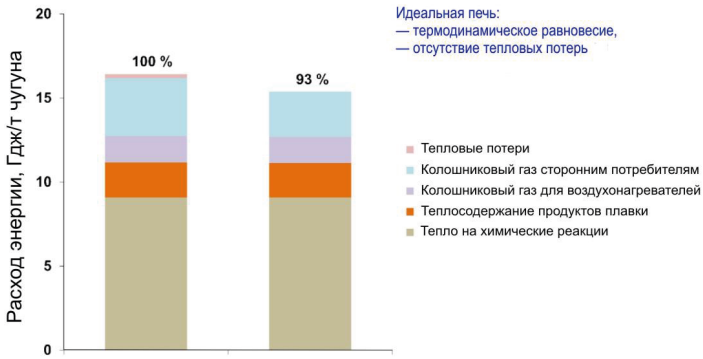


Рис.10. Расход энергии на выплавку чугуна в эффективно работающей реальной и в идеальной ДП [1].

Оценка германских специалистов подтверждается результатами работы ДП ПАО «НЛМК» в широком диапазоне интенсивности плавки (рис. 11) [14]. Таким образом, на многих эффективно работающих ДП с применением хорошо подготовленных железорудных материалов и кокса с высокой горячей прочностью и оптимальной крупностью резервы снижения расхода топлива и эмиссии CO_2 за счет повышения эффективности доменной плавки кокса в значительной мере исчерпаны. Оставшиеся резервы связаны

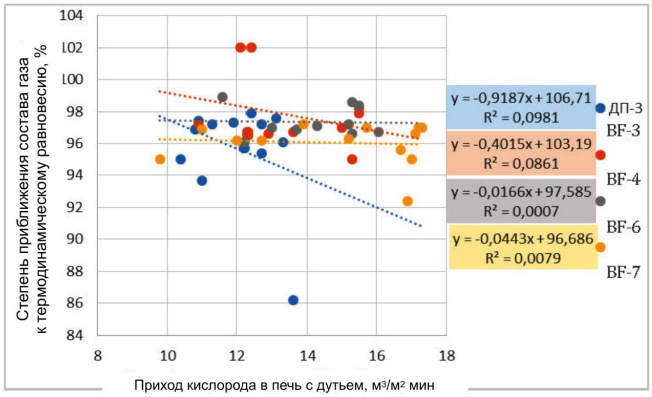


Рис. 11. Эффективность реакции восстановления вюстита в доменных печах ПАО НЛМК

в основном со снижением потерь тепла в ДП или с применением внешних источников тепла, например дутья с более высокой температурой, а также с использованием энергии давления колошникового газа в ГУБТах.

Ужесточающиеся экологические ограничения и штрафы заставляет металлургов искать новые пути развития металлургии железа. Разрабатываемая в Европе в течение ряда лет технология кислородной доменной плавки с вдуванием в ДП колошникового газа, отмытого от CO_2, и закачкой углекислоты под землю (проект ULCOS) признана чрезмерно затратной и ее промышленная реализация отложена на неопределенное время. В связи с этим рассматриваются различные возможные пути снижения затрат энергии на выплавку чугуна и снижения эмиссии CO_2. В частности, большое внимание уделяется так называемой водородной металлургии, т.е. применению в экстрактивной металлургии железа водорода, получаемого путем электролиза воды за счет электроэнергии, производимой с помощью безуглеродистой энергетики (ветер, солнце, вода, атомная энергия, биоэнергия). Дорожная карта Евросоюза предусматривает снижение эмиссии CO_2 к 2050 году на 80% по сравнению с 1990 г., в том числе за счет использования безуглеродистой энергетики. По мнению экспертов через 20–30 лет развитие такой энергетики сделает реальной водородную металлургию железа. Основанием для такого прогноза является существующий и прогнозируемый темп развития безуглеродистой энергетики в Западной Европе, где, начиная с 2013 года, прирост производства электроэнергии происходит только за счет безуглеродистой энергетики (Рис. 12) [15].

Энергетическую и экологическую эффективность технологии доменной плавки с вдуванием водорода (40 кг/т чугуна) сравнили с эффективностью технологий с вдуванием ПУТ (200 кг/т чугуна), природного газа (100 кг/т чугуна) и с применением в шихте ГБЖ (400 кг/т чугуна) с одновременным вдуванием ПУТ (127 кг/т чугуна). Минимальный расход энергии (16,5 ГДж/т) и минимальный расход кокса (295 кг/т) получен в варианте технологии с вдуванием ПУТ, а максимальный расход энергии (17,5 ГДж/т) и кокса (392 кг/т) — в варианте технологии с вдуванием водорода. Однако, с точки зрения эмиссии CO_2 вариант

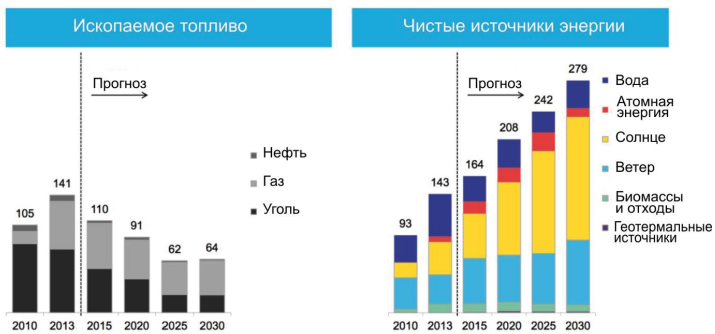


Рис. 12. Факт и прогноз динамики производства электроэнергии из ископаемых и возобновляемых безуглеродистых источников энергии

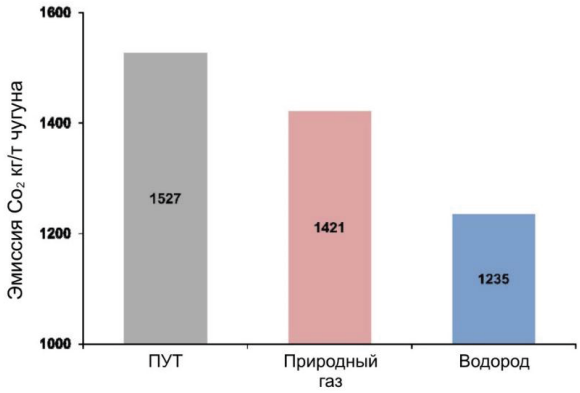


Рис. 13. Эмиссия CO_2 при выплавке чугуна с вдуванием различных топлив

с вдуванием водорода, оказался наиболее, а вариант с вдуванием ПУТ — наименее эффективным (Рис. 13) [1].

В свете решения проблемы снижения выбросов CO_2 и повышения интегральной эффективности производства стали рассмотрено несколько возможных технологических схем, включающих помимо ДП и КК реакторы прямого получения железа (MIDREX и/или HYL) и бездоменной выплавки чугуна (FINEX и/или COREX).

В настоящее время в промышленности применяются три технологические схемы выплавки стали с участием всех названных агрегатов:

1. ДП — КК;
2. FINEX/COREX — КК;
3. MIDREX/HYL — ДСП.

Минимальный интегральный расход энергии на выплавку стали (14,03 ГДЖ/т), включающий электроэнергию, производимую с помощью ископаемого топлива, прямой расход ископаемого топлива и выработку экспортного газа, обеспечивает первая, наиболее энергоэффективная схема («ДП-КК»). Наименее энергоэффективной схемой по интегральной оценке является схема 3, а именно выплавка стали в ДСП из металлизованных окатышей и ГБЖ. С экологической точки зрения, однако, эта схема является наиболее эффективной, обеспечивая минимальную эмиссию парниковых газов (1214 кг CO_2/т жидкой стали), что на 35% меньше выбросов, которые дают 1-я и 2-я технологические схемы [1].

Возможная комбинация коксодоменного производства и агрегатов Midrex или HYL с использованием 100% коксового газа для металлизации окатышей и их применением в ДСП увеличивает выплавку стали на 17%, снижает суммарные энергозатраты на 3% и эмиссию CO_2 на 10% [10]. Аналогичная схема

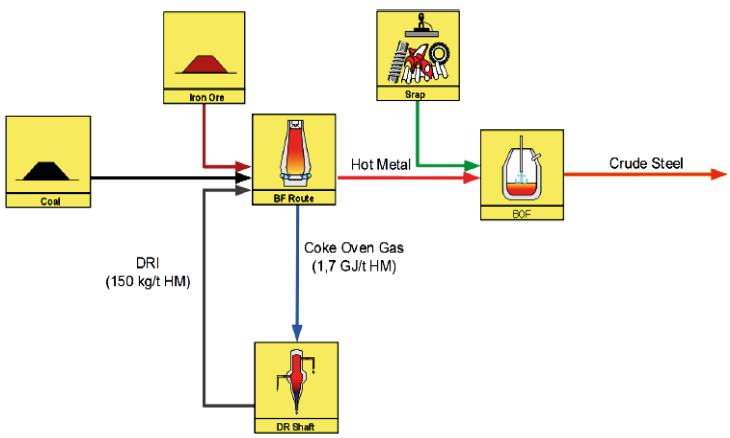


Рис.14. Комбинация ДП и агрегатов прямого получения железа на интегрированном заводе

с применением коксового газа в агрегатах MIDREX или HYL, а получаемых металлизованных продуктов — в ДП (Рис. 14) позволяет снизить расход энергии на выплавку стали на 5–7% и эмиссию CO_2 на 6% [10].

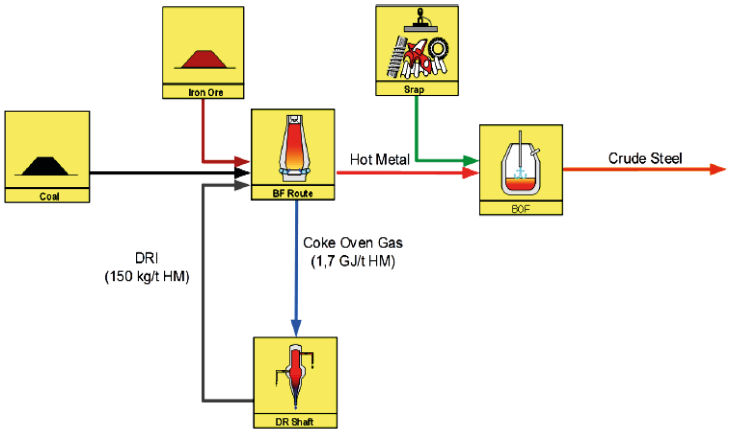


Рис. 15. Комбинация ДП и агрегата FINEX на интегрированном заводе.

Комплекс ДП и FINEX , в котором используется низкосортная руда, а часть металлизованной руды загружается в ДП, по расчету позволяет снизить расход угля на 40 кг/т стали и эмиссию CO_2 на 100 кг/т. стали (рис. 15).

Значительное снижение эмиссии CO_2 и интегральных затрат энергии на выплавку стали обеспечивает разрабатываемая компаниями Lanza Tech (США) и Primetals (Австрия) принципиально новая технология утилизации экспортного газа металлургических агрегатов. Суть ее заключается в микробиологической ферментации (бактериальное брожение) углеродсодержащих отходящих металлургических газов (рис.16) с получением этанола и других химических продуктов [16].

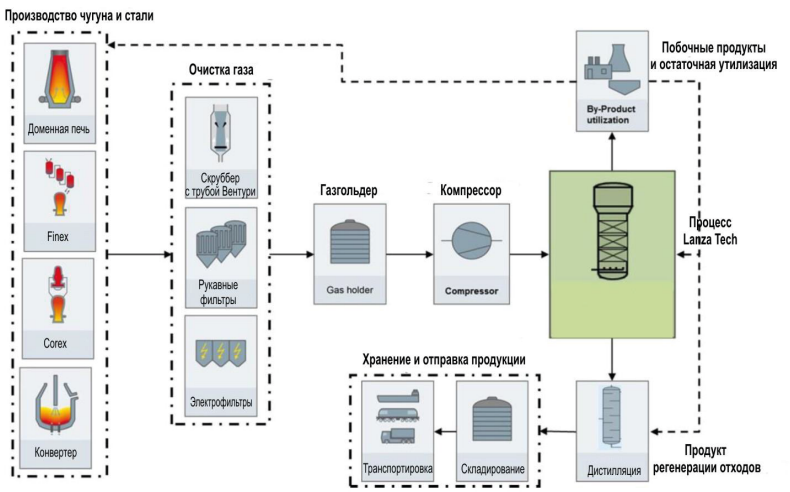


Рис. 16. Схема утилизации газов по технологии Lanza Tech..

Основные этапы технология LanzaTech:

- очистка газов от пыли, углеводородов и кислорода;
- накопление газа в газгольдерах;
- компремирование газа;

- вдувание газа в водную среду реактора ферментации газа;
- извлечение из реактора продуктов ферментации и отходов;
- получение и складирование готовых продуктов.

В 2012 году компания Lanza Tech успешно запустила в Китае на заводах Baosteel и Shougang две полупромышленные установки по превращению в этанол колошниковых газов агрегата COREX и ДП, а также конвертерного газа. Для исследований и дальнейшей разработки технологии в рамках программы EU2020 компании Lanza Tech и Primetals совместно с компанией ArcelorMittal реализуют проект Горизонт 2020 «Steelanol», целью которого является ежегодное производство 47000 тонн этанола. На реализацию проекта выделен грант на сумму 10,2 млн евро. Дорожная карта проекта предусматривает запуск первого крупномасштабного реактора по производству этанола во второй половине 2017 года и выход комплекса на полную мощность в 2019 году [11].

По сравнению со сжиганием газа в котлах для производства электроэнергии технология Lanza Tech вдвое эффективнее превращает металлургические газы в энергию (рис. 17) и обеспечивает при этом снижение выбросов NO_x и SO_x на 85% а CO_2 на 30–50%.

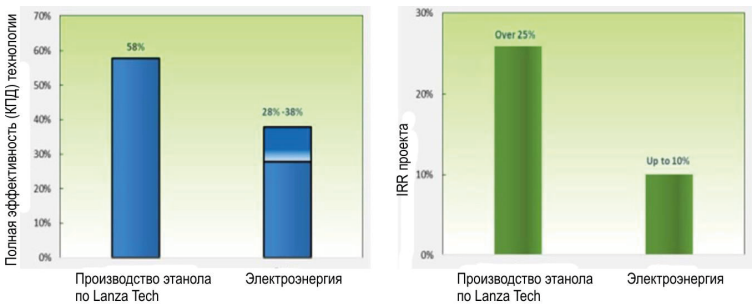


Рис. 17. Сравнение эффективности 2-х схем утилизации металлургических газов.

По сравнению с эффективностью проектов сжигания отходящих металлургических газов с целью производства электроэнергии (28–38%), эффективность производства энергии в виде жидкого этанола из этих газов путем их ферментации по технологии LanzaTech (58%) почти вдвое выше. Соответствующие IRR этих проектов составляют 10% и 25%. Капитальные затраты на реализацию технологии LanzaTech зависят от региональных условий и в условиях Китая, например, Capex проекта составляет 0,8–1,3 евро на 1 литр получаемого этанола.

Экологические характеристики технологии Lanza Tech также превосходят характеристики технологии сжигания газов для производства электроэнергии, по сравнению с которой технология Lanza Tech обеспечивает снижение выбросов NOx на 85% и CO_2 на 30–50%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы темп роста производства стали у ведущих ее производителей замедлился в связи со снижением роста ее потребления и возрастающими экологическими ограничениями.

Эффективность использования энергии в ДП ведущих производителей стали приблизилась к термодинамическому пределу и оставшиеся резервы снижения расхода топлива за счет совершенствования технологии доменной плавки незначительны.

Проект ULCOS (кислородная доменная плавка с рециркуляцией колошникового газа, отмытого от CO_2, и захоронением CO_2) признается экономически чрезмерно затратным.

В качестве энергетически и экологически эффективных путей развития металлургии железа в предстоящие десятилетия рассматриваются:

- Доменная плавка и прямое получение железа с использованием водорода, производимого за счет электроэнергии, получаемой от возобновляемых безуглеродистых источников энергии;
- Комбинация на заводах интегрального типа агло-коксодоменного производства с процессами прямого получения железа в шахных реакторах и/или с процессами выплавки чугуна в агрегатах FINEX или COREX;
- Симбиоз сталеплавильной и химической промышленности с использованием технологии Lanza Tech микробиологической ферментации отходящих металлургических газов для производства из них этанола и других химических продуктов.

Список литературы

1. Peter Schmoele. The Blast Furnace — Fit for Future? Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress — ECIC 2016. P.3–12
2. Sang-Ho Yi. Updates on the FINEX, a Commercially Proven Alternative Ironmaking Process. Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress — ECIC 2016. P.13–20.
3. Shibu John, Hanspeter Ofner, Norbert Rein, Sang-Ho Yi, Shungkee Shin/ FINEX — an Innovative Environment Friendly Ironmaking Process. Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress — ECIC 2016. P. 793–805.
4. Cristian Bohm, Wolfgang Sterrer, Johann Wurm, Barbara Rammer. COREX-an Alternative for Hot Metal Production in a Challenging Enviroment. Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress — ECIC 2016. P.806–818.
5. Thomas Buergler, Irmela Kofler. Direct Reduction Technology as a Flexible Tool to Reduce CO2 Intensity of Iron and Steelmaking. Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress — ECIC 2016. P. 284–291.
6. Production and Technology of Iron and Steel in Japan 2015. Review. ISIJ International, Vol.56 (2016), №6, pp. 905–916.
7. Lungen H.B., Peters V., Schmole P. Ironmaking in Western Europe — Status Quo and Future Trends. Proceedings of the 7th International Congress of Ironmaking Technologies. AISTech 2015. Vol.1 P. 1481–1549.
8. Xuegong Bi, SHourong Zhang. The Past, Present and the Prospects of Ironmaking in China. Proceedings of the 7th International Congress of Ironmaking Technologies. AISTech 2015. Vol.1 P. 1472–1480.
9. Saito K. Kurita Y. Current Status and Perspective of Japanese Ironmaking Technology for Environmental Solution. Proceedings of the 7th International Congress of Ironmaking Technologies. AISTech2015. Vol. 1 P. 1463–1471.
10. Yi S.-H., Lee H.-G. Ironmaking in South Korea — Beyong the Blast Furnace. Proceedings of the 7th International Congress of Ironmaking Technologies. AISTech 2015. Vol.1 P. 1491–1498.
11. Louis W. Lherbier, John Ricketts. Ironmaking in North America. Proceedings of the 7th International Congress of Ironmaking Technologies. AISTech 2015. Vol. P. 1443–1451.
12. Erich Torres Bispo dos Seintos, Jorge Adelino de Faria, Edson Luis Massonori Horano. Development in Ironmaking in South America. Proceedings of the 7th International Congress of Ironmaking Technologies. AISTech 2015. Vol.1. P. 1452–1463.
13. Barbara Rammer, Robert Millner, Christian Boehm. Comparing the CO2 Emission of Different Ironmaking Rout. Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress — ECIC 2016. P. 284–291.
14. S. Filatov, I. Kurunov, D. Tihonov. Reserves Reserves for Rasing the Efficiency of Blast Furnace Process. Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress — ECIC 2016. P.184–191.
15. Johannes Schenk, Hans Bodo Lungen. Evaluation of the Capabilities of Direct and Smelting Reduction Processes to Enhance the Energy Efficiency and to Reduce the CO2 Emission of the Steel Production in Europe. Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress — ECIC 2016. P. 13–23.
16. Alexander Fleischandlerl, Tobias Plattner, Prabhakar Nair, Carl Wolf/ The Circular Economy: Carbon Recicluing and the Iron Industry. Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress — ECIC 2016. P. 332–341.

Третяк А.А., ООО «Фирма «ТАЛС-1»

ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО В РОССИИ 2011–2016 ГОДЫ В СВЕТЕ ВЫЗОВОВ 21 ВЕКА

1. ПРОИЗВОДСТВО ОСНОВНЫХ ВИДОВ ПРОДУКЦИИ

За период 2011–2015 г. г. годовое производство основных видов продукции в Черной металлургии России характеризуется определенной стабильностью и составляет (табл. 1, рис. 1):

- железной руды 104–106 млн. т;
- металлургического кокса — 25–29 млн. т;
- чугуна — 50–52,5 млн. т;
- стали — 69,0–71,0 млн. т;
- проката готового — 59,0–61,0 млн. т;
- труб — 10–11 млн. т.

Производство в России готового проката (табл. 2, рис. 2) определяется внутренним потреблением и показателями экспорта/импорта. С 2014 года, в период снижения финансирования программ развития в РФ, наблюдается тенденция на снижение металлопотребления практически по всем отраслям промышленности. Производство готовой продукции определяется соотношением экспорта/импорта и позволяет поддерживать производство на одном уровне.

Таблица 1. Производство основных видов продукции в России в 2007–2015 гг. (млн. т)

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	% 2015 г.		I квартал		I кв. 2016 г. в % к I кв. 2015 г.
										к 2014 г.	к 2007 г.	2016 г.	2015 г.	
Руда железная	104,8	100,1	91,8	102,1	109,0	106,4	105,1	103,7	104,1	100,3%	99,3%	26,23	26,03	100,8%
Чугун	51,5	48,3	43,9	48,0	48,1	50,4	49,9	51,4	52,4	101,9%	101,7%	13,1	12,91	101,5%
Сталь	72,8	69,3	59,8	67,0	68,6	70,5	69,0	71,7	70,8	98,7%	97,2%	17,16	18,17	94,5%
Прокат готовый	59,6	56,7	51,5	58,2	59,2	61,1	60,1	62,3	61,5	98,8%	103,2%	14,84	15,64	94,9%
Трубы стальные	8,7	7,8	6,7	9,1	9,8	9,4	9,9	11,0	11,2	101,9%	128,8%	2,618	2,754	95,1%
Кокс металлургич.	31,9	30,2	23,0	28,4	28,9	29,0	25,0	25,6	25,1	98,2%	78,7%	6,258	6,216	100,7%

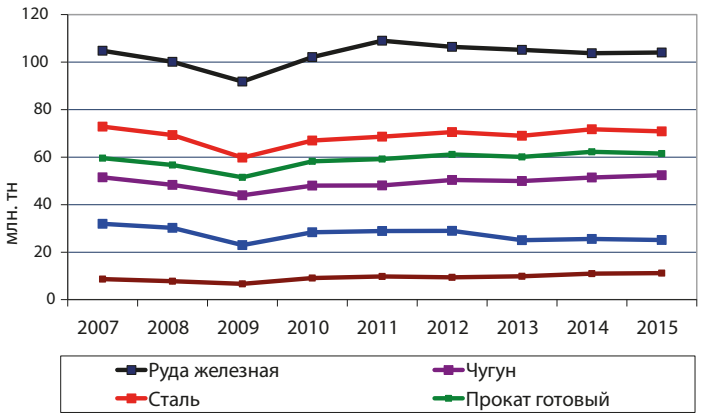


Рис. 1. Производство основных видов продукции в России в 2007–2015 гг.

Таблица 2. Производство и потребление готового проката за период 2000–2015 гг. (млн. т)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Производство проката	47,0	47,1	48,7	51,0	53,8	54,6	58,2	59,6	56,6	50,9	56,8	59,1	61,1	60,1	61,9	61,5
Экспорт	25,8	24,6	27,3	26,5	28,3	29,2	27,8	26,7	25,7	27,5	28,0	24,6	27,0	25,4	25,9	28,0
Импорт	1,8	2,0	1,5	2,3	3,0	3,6	4,4	5,9	5,2	3,2	4,6	6,0	6,1	7,2	5,4	3,9
Металлопотребление	23,0	24,5	22,9	26,8	28,5	29,0	34,8	38,8	36,1	26,6	33,4	40,5	40,2	41,9	41,4	37,4

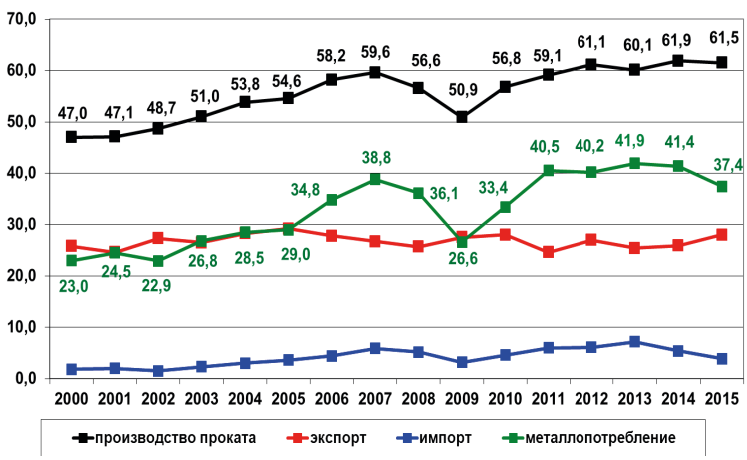


Рис. 2. Производство и потребление в 2007–2015 гг.

2. ПРОИЗВОДСТВО КОКСА

Мировое производство кокса с 2011 по 2015 г. г. увеличилось с 527 до 685 млн. т в год за счет роста производства в Китае с 312 до 448 млн. т и Индии с 18 до 31 млн. т. В остальных странах мира производство кокса имеет небольшие колебания и находится на стабильном уровне. Крупнейшие производители кокса в мире начиная с 2008 года представлены в таблице 3.

В Российской Федерации производство кокса сконцентрировано на металлургических предприятиях и отдельных коксохимических заводах, которые входят в объединения и холдинги.

На 01.01.2016 г. эксплуатируется 55 коксовых батареи (3544 печей) с проектной мощностью 36,3 млн. т.

Производство кокса осуществляется за счет поставки коксующих углей с угольных бассейнов России: Кузнецкий — 30,5; Воркутинский — 2,2; Печорский — 1,45; Южно-Якутский — 0,7 млн. т.

В РФ в 2015 г. удельный расход углей на 1 тонну валового кокса составил 1,305 т/т. В целом было потреблено — 36,3 млн. тонн коксующегося угля.

Таблица № 3. Характеристика коксовых батарей по предприятиям России по состоянию на 01.01.2016 г.

Наименование предприятия	Количество коксовых батарей	Год ввода	Проектная мощность, т. т	Количество печей в батарее
ОАО «ММК»	9	1964–1986	6603	573
ОАО «ЕВРАЗ НТМК»	4	1989–2006	2846	264
ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»	5	1971–2005	3830	349
ПАО «НЛМК»	4	1989–2006	2540	276
ОАО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»	4	1988–2014	1968	248
ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ»	8	1978–2013	5160	536
ООО «МЕЧЕЛ-КОКС»	7	1981–2011	3250	435
ОАО «МОСКОКС»	4	1993–1996	1316	178
ОАО «АЛТАЙ-КОКС»	5	1981–2006	5000	354
ОАО «КОКС» КЕМЕРОВО	4	1975–2007	3180	266
ОАО «ГУБАХИНСКИЙ КОКС»	1	2011	650	65

3. ПРОИЗВОДСТВО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ

В доменном производстве России используется подготовленное железорудное сырье в виде агломерата собственных агломерационных фабрик и окисленные окатыши с горно-обогатительных фабрик.

В 2015 г. в России производство агломерата на агломерационных фабриках составило 65,4 млн. т. Высокое производство агломерата (в млн. тонн) в 2015 г. составило на ОАО «НЛМК» — 15,2; ОАО «ММК» — 10,7; ОАО «Северсталь» ЧерМК — 9,3; ОАО «ЕВРАЗ Качканарский ГОК и Высокогорский ГОК» — 5,0, ОАО «МЕЧЕЛ» ЧелМК — 5,0.

Производство окисленных окатышей в 2015 г. на горно-обогатительных фабриках составило — 41,0 млн. т. (ЛебГОК — 9,04; МихГОК — 10,97; Карельский окатыш — 6,52; Качканарский ГОК — 6,5; ОЭМК — 3,8).

Производство металлизованных окатышей на Оскольском электрометаллургическом комбинате составило 2,86 млн. т.

Производство металлизованных брикетов на Лебединском ГОКе — 2,6 млн. т.

4. ПРОИЗВОДСТВО ЧУГУНА

На 01.11.2016 г. на металлургических предприятиях России в эксплуатации находятся доменные печи различных объемов.

Таблица 4. Российская Федерация. Объемы доменных печей.

Комбинат, завод	ДП-1	ДП-2	ДП-3	ДП-4	ДП-5	ДП-6	ДП-7	ДП-8	ДП-9	ДП-10
ОАО «ММК»	1370	1370		1370		1380	1371	1371	2014	2014
ПАО «ЧЕРМК»	1007	1033	Консервация	2700	5580					
ПАО «НЛМК»		1000	2000	2000	3200	3200	4291			
ЕВРАЗ ЗСМК	3000	2000	3000							
ЕВРАЗ НТМК					2200	2200	Строится			
ЧЕЛМК	2038			1386	1719					
УРАЛ. СТАЛЬ	1007	1033	1513	2000						
ТУЛАЧЕРМЕТ	1510	1144	2200							
КМЗ	1066	462	759							
СЧПЗ	224		350							
НАДЕЖД. МЗ	260		205		212					

Производство чугуна на предприятиях России с 2011 по 2015 г.г. представлено в таблице № 5.

Таблица 5. Российская Федерация. Производство чугуна на предприятиях.

Наименование	2011	2012	2013	2014	2015
ОАО «ММК»	9496,5	10113,9	9586,4	10280,9	10132,1
ОАО «Северсталь»	8815,1	8407,0	8759,4	9075,6	9243,5
ПАО «НЛМК»	9792,9	11879,7	11823,3	12137,2	12802,7
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	5806,0	5715,0	6059,0	5888,0	5843,0
ОАО «ЕВРАЗ НТМК»	4693,9	4834,8	4936,2	4817,5	4921,0
ОАО «ЧелМК»	3728,0	4161,1	3742,9	3945,8	4064,9
АО «Урал. Сталь»	2458,1	2084,6	2185,6	2291,2	2465,0
ПАО «Тулачермет»	2156,1	2121,2	2098,1	2188,6	2058,9
ПАО «КМЗ»	474,4	475,0	425,5	493,0	475,2
ПАО «Надеждин. МЗ»	350,0	334,9	337,3	283,4	351,2
АО «Чусовской МЗ»	127,6	102,8	22,00	0,0	0,0
ООО «ЛЭ Верхнесин. МЗ»	67,6	0,0	0,0	0,0	0,0
ОАО «Свободный Сокол»	135,5	131,3	0,0	0,0	0,0
ОАО «Алап.МЗ»	0,0	75,3	0,0	0,0	0,0
Всего РФ	48101,7	50436,6	49975,7	51401,2	52371,3
ПАО «КМЗ» Fe-Mn				68,0	59,7
ОАО «СЧПЗ»				110,5	95,7
Доменный Fe-Mn				178,5	155,4

Производственные мощности доменного производства в России в настоящее время составляют порядка 54,0 млн. т в год (без учета остановленных доменных печей).

Производство чугуна на металлургических предприятиях определяется его потребностью для дальнейшего передела в сталеплавильном производстве, остановками на капитальные ремонты и технологическими режимами, связанными с комбинированным дутьем и качеством железорудного сырья и металлургического кокса. Практически весь чугун на крупных предприятиях (ПАО «НЛМК», ОАО «ММК», ЧерМК, ЕВРАЗ-НТМК, ЕВРАЗ-ЗСМК, ОАО «МЕЧЕЛ» ЧелМК и др.) выплавляется передельный (литейный — плавится в период раздувок доменных печей и наличия заказов для внутреннего внешнего рынка). Так, в 2014, 2015 годах было выплавлено литейного чугуна на доменных печах 298,4 и 225,9 тыс. тонн, (в том числе соответственно на ОАО «Тулачермет» 132,4 т.т. и 108,9 т.т.; ПАО «КМЗ»153,8 т.т. и 104,4 т.т.) Существенный рост производства передельного чугуна произошел на ПАО «НЛМК» за счет ввода в эксплуатацию в доменном цехе № 2 ДП-7 V= 4280 м^3. В результате освоения мощности ДП-7 производство чугуна в 2015 г. на ПАО «НЛМК» возросло до уровня 12,8 млн. тонн в год. Этот показатель является рекордным для доменного производства России. На крупных металлургических комбинатах производство стабилизировано на оптимальном уровне, что позволяет поддерживать технологические режимы на доменных печах на заданных параметрах. За данный период времени были остановлены доменные печи на АО «Чусовской МЗ», ООО «ЛЭ Верхнесинечихинский МЗ», ОАО «Липецкий завод «Свободный Сокол», ООО «Алапаевский МЗ».

Товарный чугун выплавляется в основном на трех предприятиях: ОАО «Уральская Сталь», ОАО «Тулачермет» и ПАО «КМЗ». Виды товарного чугуна: передельный обычный, полунодулярный, нодулярный; литейный обычный, нодулярный. Технология выплавки полунодулярных и нодулярных чугунов освоена на ОАО «Тулачермет» (ДП-2) и ПАО «КМЗ» (ДП-1, ДП-3). Данный вид чугунов поставляется на экспорт.

Эксплуатация ДП-2 ПАО «КМЗ» и ДП-1, ДП-3 ОАО «СЧПЗ» связана с выплавкой доменного ферромарганца. На заводах освоен выпуск фракционированного доменного ферромарганца с содержание Mn до 78–79% и содержанием P не более 0, 20%. На ОАО «СЧПЗ» освоена выплавка доменного ферромарганца с использованием в шихте марганцевого агломерата, который производится на новой агломерационной машине предприятия.

5. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОКС ДЛЯ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Качество металлургического кокса для производства чугуна на металлургических комбинатах и заводах России не сильно отличается и зависит в основном от сырьевой базы, состоянием коксовых батарей и технологических режимов работы.

Качественные характеристики кокса представлены в таблице № 6.

Таблица 6. Качественные характеристики кокса за 2015 год, загружаемого в доменные печи

Наименование предприятия	S,%	Зола,%	Л.В.,%	W,%	M25	M10
ОАО «ММК»	0.486	12.7	1.31	3.06	88.3	8.16
ОАО «ЕВРАЗ НТМК»	0.59	11.7	1.10	2.10	88.0	8.00
ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»	0.45	12.03	1.0	0.8	88.37	7.73
АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»	0.50	11.70	1.00	3.50	85.2	9.20
ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ» ЧерМК	0.52	11.70	0.7	1.8	77.9	8.13
ПАО «НЛМК»	0.71	10.48	0.64	1.26	86.04	7.89
ПАО «ТУЛАЧЕРМЕТ»	0.45	11.59	0.72	5.39	84.9	7.40
ПАО «ЧелМК»	0.44	13.04	0.48	4.71	87,0	8.56
ПАО «КМЗ»	0.51	11.81	0.63	4.55	73.0	7.00
АО «СЧПЗ»	0.47	11.2		5.5	75.4	8.60
ПАО «НАДЕЖДИНСКИЙ МЗ»	0.45	11.6	0.6	3.60	84.5	8.30
Черная металлургия России	0.54	11.78	0.86	2.37	85.19	8.01

По сравнению с передовыми мировыми компаниями применяющие новые технологии при производстве кокса и более качественный уголь качество кокса в РФ уступает мировым показателям. Зарубежные компании (Западная Европа, Япония, Китай), применяющие пылеугольное топливо с удельным расходом более 160 кг/т чугуна используют металлургический кокс с показателем горячей прочности не менее 65%.

Для улучшения показателя горячей прочности на КХП предприятий России используются в угольной шихте добавки нефтекокса.

6. ПОДГОТОВЛЕННОЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

В доменном производстве России основным подготовленным железорудным сырьем является агломерат, окисленные окатыши и доменная железная руда. Основные показатели удельного расхода железорудных материалов при производстве чугуна представлены в таблице № 7.

Таблица 7. Удельный расход ЖРМ при производстве чугуна, кг/т за 2015 год

Предприятие	ЖРЧ	Агломерат	Окатыши	Руда доменная	Металло-добавки
ОАО «ММК»	1639.6	1054.7	584.4	0.5	12.1
ОАО «ЕВРАЗ НТМК»	1639.3	766.0	873.3		76.9
ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»	1687.8	1301.6	348.1	38.1	4.6
АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»	1797.9	1189.5	593.5	14.9	
ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ» ЧерМК	1530.5	1003.9	506.9	19.7	48.3
ПАО «НЛМК»	1659.0	1104.1	539.5	15.4	13.7
ПАО «ТУЛАЧЕРМЕТ»	1646.7	1582.0	13.5	51.2	37.7
ПАО «ЧелМК»	1657.3	1301.7	254.2	1.4	16.9
ПАО «НАДЕЖДИНСКИЙ МЗ»	1776.2	1774.6		1.6	142.4
РФ (чугун — всего)	1640.3	1117.2	508.4	14.7	26.2

Кроме железорудной части шихты при выплавке различных марок чугуна используются различные добавки (марганцевая руда, окалина (ОАО «ММК»); сварочный шлак (ОАО «ЕВРАЗ НТМК» «ЕВРАЗ ЗСМК» ПАО Надежд.МЗ»); металлодобавки (ОАО «ЕВРАЗ НТМК», ОАО «Северсталь» ЧерМК, ОАО ЕВРАЗ ЗСМК», ПАО «ТУЛАЧЕРМЕТ»); конверторный шлак ПАО «Северсталь» ЧерМК), ПАО «МЕЧЕЛ»).

Удельный расход добавок представлен в таблице № 8.

Таблица 8. Удельный расход добавок на выплавку чугуна и доменного Fe-Mn в РФ за 2015 год

Вид чугуна	Руда Mn	Окалина	Св. шлак	Металло-добавки	Конв. шлак	Изв. ДП
ЧМ России, в т.ч.	3,6	2,7	0,6	18,2	5,2	2,6
Передельный чугун	0,3	2,7	0,6	18,1	5,2	2,0
Литейный чугун	20,1	–	–	46,0	–	97,3
Доменный Fe-Mn	2456,1	–	–	–	–	–

Химический состав и влажность загружаемых в доменную печь подготовленные железорудные материалы представлены в таблице № 9.

Таблица 9. Химический состав и влажность загружаемых в доменную печь ПЖРМ

Предприятие	Fe	FeO	Mn	SiO_2	CaO/SiO_2	W
ОАО «ММК»						
Агломерат	55.155	11.05		6.269	1.819	
Окатыши	63.869			6.918	0.124	
ОАО «ЕВРАЗ НТМК»						
Агломерат	53.68	9.43		4.87	2.28	
Окатыши	61.02	3.40		3.89	0.30	
ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»						
Руда железная	47.97					4.04
Агломерат	56.0	13.2	0.42	6.84	1.47	
Окатыши	63.96					0.4
АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»						
Руда железная						
Агломерат	52.05	10.85	0.13	8.5	1.72	
Окатыши	64.76	1.39	0.027	7.95	0.1	
ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ» ЧерМК						
Руда железная	44.19			29.41		
Агломерат	59.61	13.36		5.62	1.25	
Окатыши	65.85			3.3	0.61	
ПАО «НЛМК»						
Руда железная	31.75					
Агломерат	55.13	11.38		6.70	1.72	
Окатыши	63.67			7.25		
ПАО «ТУЛАЧЕРМЕТ»						
Руда железная	42.54	2.83	0.01	35.27		1.56
Агломерат	58.69	11.78	0.04	6.63	1.3	
Окатыши	62.75	1.0	0.02	8.61	0.102	
ПАО «ЧелМК»						
Руда железная	56.49					
Агломерат	57.55					
Окатыши	62.37					
ПАО «НАДЕЖДИНСКИЙ МЗ»						
Руда железная	63.0			4.42		
Агломерат	52.65	14.94		8.99	1.31	

Удельный расход агломерата на выплавку чугуна на ПАО «Надеждинский МЗ», ПАО «Тулачермет», ПАО «МЕЧЕЛ», АОА «ЕВРАЗ ЗСМК» составляет от 77 до 98%. Выплавка чугуна на ПАО «Косогорский МЗ» осуществляется на окисленных кислых окатышах ОАО «Михайловский ГОК». Качканарский ГОК поставляет агломерат на ОАО «ЕВРАЗ НТМК».

Окисленные окатыши поставляются на металлургические предприятия России с Лебединского, Михайловского, Костомукского, Качканарского ГОКов и Соколовско-Сарбайского ГОКа (Казахстан). Объемы поставок окатышей и доменной руды на производство чугуна на предприятия России с горно-обогатительных комбинатов представлены в таблице № 10.

Таблица 10. Поставка подготовленного сырья с ГОКов на производство чугуна в 2015 г. (тыс. т)

Наименование ГОКа	Агломерат	Окатыши	Доменная руда
Лебединский		3181	
Михайловский		9801	345
Костомукский		7264	
Качканарский	3510	6249	
Высокогорский	1480		
Евраз руда			62
Соколовско-Сарбайский		1606	

7. ТЕХНОЛОГИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Технология доменной плавки в период 2011–2016 год опирается на научные и технические разработки советских и российских ученых и практиков. В этот период наблюдается использование в доменном производстве технологий, разработанных в зарубежных компаниях и внедренных на доменных печах в комплексе с поставкой металлургического оборудования. Это прежде всего относится к внедренным на доменных печах России:

- бесконусные загрузочные устройства;
- установки по подготовке и вдувании угольной пыли;
- новые средства контроля и управления доменной плавкой на базе современных средств электронной техники.

Основнымии принципами технологии доменной плавки в современных условиях являются:

- эксплуатация доменных печей с соблюдением ровного хода в соответствии с качеством подготовленного железорудного сырья и металлургического кокса;
- использование кислорода, природного газа и пылеугольного топлива в комбинированном дутье;
- поддержание температуры горячего дутья в соответствии с техническим состоянием воздухонагревателей и режимными картами их эксплуатации;
- использование локальных математических моделей и электронных средств для снижения рисков расстройств хода доменной печи и отклонений от оптимальных режимов по газодинамике, тепловому состоянию, химическому составу чугуна и шлака, использованию газа.

Выплавка чугуна на предприятиях осуществляется на комбинированном дутье с использованием кислорода (кроме ПАО «КМЗ», АО «СЧПЗ»). За 2015 год на доменных печах предприятий РФ содержания кислорода в дутье составило — 27,7%. Максимальное содержание достигнуто на АО «ЕВРАЗ НТМК» — 31,2%; ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ» ЧерМК — 29,55%; ПАО «НЛМК» — 29,22%.

Природный газ применяется на доменных печах всех предприятий РФ (кроме АО «СЧПЗ»).

Удельный расход природного на весь чугун в РФ составляет в 2015 году — 96,9 м^3/т чугуна (2014 г. — 96,5 м^3/т).

Пылеугольное топлива используется на доменных печах ПАО «ЕВРАЗ НТМК», ПАО «ЕВРАЗ ЗСМК», ПАО «НЛМК». В целом по РФ на выплавку передельного чугуна удельный расход пылеугольного топлива в 2015 г. составил 23,2 кг/т (2104 г. — 16,7 кг/т).

Температура горячего дутья на доменных печах РФ составила — 1138,1 °С. С высокой температурой работали доменный печи ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ» ЧерМК — 1182,0°С, ОАО «ЕВРАЗ НТМК» — 1182 °С, ПАО «НЛМК» — 1161°С. С максимальной температурой горячего дутья работали: ПАО «НЛМК» ДП 7 — 1222°С, ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ» ЧерМК ДП 4 — 1220°С, АО «СЧПЗ» ДП 3 — 1211°С.

Основной комплексный показатель работы доменных цехов предприятий России остается удельный расход скипового кокса. В РФ удельный расход кокса составил в 2015 г. — 422 кг/т чугуна. Лучшие показатели достигнуты на металлургических предприятиях: ОАО «ЕВРАЗ НТМК» — 361,9 кг/т; ПАО «НЛМК» — 375,5 кг/т; ПАО СЕВЕРСТАЛЬ» ЧерМК — 404,6 кг/т.

Доменные печи, работающие с применением пылеугольного топлива за 2015 г имеют показатели отображенные в таблице № 11.

Таблица № 11. Удельный расход технологического топлива на металлургических предприятиях, использующие пылеугольное топливо. 2015 г.

Объединение Предприятие	Уд. р-д скип. кокса (сух,), кг/т	Мелочь кокс. (сух,) кг/т	ПГ, м³/т	ПУТ, кг/т	Кислород, м³/т
ОАО «ЕВРАЗ НТМК»	361,9	21,9	108,3	53,7	127,2
ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»	404,8	33.3	44,9	70,4	84,1
ПАО «НЛМК»	375,5	42,1	102,3	40,9	109,3

Доменные печи, работающие без применения пылеугольного топлива, за 2015 г. имеют показатели, отображенные в таблице № 12.

Таблица 12. Удельный расход технологического топлива на передельный чугун в доменных цехах. 2015 г.

Объединение Предприятие	Уд. р-д скип. кокса (сух,), кг/т	Мелочь кокс. (сух,) кг/т	ПГ, м³/т	Кислород, м³/т
ОАО «ММК»	431,7	26,5	102,2	130,2
АО «Уральская Сталь»	458,9	36,5	99,3	89,9
ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ» ЧерМК	404,6	20,3	118,4	114,8
ПАО «Тулачермет»	454,6	33,8	57,5	55,6
ПАО «ЧелМК»	452,0	21,4	98,7	74,5
ПАО «Надеждинский МЗ»	488,3	17,6	96,8	

В 2015 г. производительность доменных печей в Российской Федерации составила 2,313 т/м³ сут.

По предприятиям производительность представлена в таблице № 13.

Таблица 13. Производительность доменных цехов металлургических предприятий России. 2015 г.

Предприятие	Полезный объем, м³	Капитальные ремонты, суток	Производительность т/м³ сут
ЧМ, Россия	73192	1762	2,313
ПАО «ЕВРАЗ НТМК»	4400	16	3,211
ПАО «НЛМК»	14691	96	2,533
ПАО «Северсталь»	12240	19	2,515
ПАО «ММК»	12260	115	2,352
ПАО «МЕЧЕЛ»	5143	16	2,195
ПАО «ЕВРАЗ ЗСМК»	8000	14	2,030
АО «Уральская Сталь»	5553	8	1,914
ПАО «Тулачермет»	3344	21	1,776
ПАО «Надеждинский МЗ»	677	362	2,061
ПАО «КМЗ»*	2287	148	1,002
АО «СЧПЗ»*	574	0	1,144

* *— с учетов выплавки доменного ферромарганца*

Выплавка чугуна на каждой доменной печи осуществляется с использованием различного вида сырья и технологического топлива. Основные продукты плавки — чугун, шлак, колошниковый газ отличаются своим химическим составом и удельным выходом.

В 2015 году химический состав чугуна, шлака и колошникового газа в РФ и металлургическим предприятиям представлен в таблице № 14 и таблице № 15.

Таблица 14. Химический состав чугуна, шлака, колошникового газа. 2015 г.

Предприятие	Пр-во т.т.	Химический состав чугуна,%				Химический состав шлака,%				
		Si	Mn	P	S	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	FeO
ЧМ пер.	**52137**	**0.537**	**0.329**	**0.072**	**0.021**	**37.58**	**10.268**	**38.66**	**9.166**	**0.405**
Литейн	**219**	**2.282**	**0.499**	**0.047**	**0.018**	**40.347**	**5.730**	**42.812**	**5.981**	**0.274**
Fe-Mn	**155**	**1.146**	**78.959**	**0.112**	**0.011**	**35.570**	**6.218**	**41,619**	**7.571**	**0.110**
ММК	10132	0.834	0.262	0.065	0.018	38.57	10.71	38.84	9.02	0.24
УРАЛ СТ	2465	0.60	0.10	0.042	0.017	43.36	7.47	45.83	4.80	0.31
ЧерМК	9243	0.51	0.39	0.084	0.019	37.99	10.39	38.02	11.50	0.34
НЛМК	12801	0.45	0.30	0.06	0.020	39.68	6.85	40.63	10.33	0.47
НТМК	4921	0.086	0.387	0.05	0.023	27.59	15.00	32.91	14.10	0.56
ЗСМК	5843	0.48	0.52	0.092	0.022	36.95	12.23	39.52	0.56	0.40
КМЗ	371	0.80	0.03	0.031	0.012	39.94	5.38	44.80	6.62	0.28
ТУЛАЧМ	1950	0.78	0.07	0.058	0.025	42.14	5.17	44.61	5.72	0.31
ЧелМК	4061	0.57	0.39	0.13	0.03	34.85	15.47	31.18	14.18	0.66
НАД МЗ	350	0.652	0.452	0.105	0.028	35.292	12.865	41.353	6.936	0.504

Таблица 15. Показатели по выходу доменного газа

Предприятие	ВАЛОВЫЙ ВЫХОД тыс. $м^3$	ВЫХОД на 1 т кокса, $м^3$	ВЫХОД на 1 т чугуна, $м^3$	CO_2	CO	H_2	Каллорийность. Ккал/$м^3$	Уд. теплотворн. способность кг ут/т
ЧМ РФ	72600457	3408	1405,8	20,6	23,6	7,9	806,5	162
ММК	13235971	3026	1306,3	18,8	24,7	8,6	894,0	166,8
УРАЛ СТ	3505170	3099	1422,1	17,0	21,2	7,6	744	151
ЧерМК	12955565	3464	1401,5	22,5	24,4	10,1	890	178
НЛМК	17918446	3727	1399,5	22,3	24,5	9,0	906	181
НТМК	5455631	3625	1311,9	22,6	22,1	6,7	1000	187
ЗСМК	7682257	3248	1314,8	21,4	23,6	5,3	792	149
КМЗ	1090121	2912	2036,9	16,7	21,4	3,0	754	219
ТУЛАЧМ	2912812	3073	1428,9	20,1	22,4	5,2	802	164
ЧелМК	5515712	3002	1356,9	17,6	23,0	6,6		

Доменный газ используется на объектах газового хозяйства предприятия. Для нагрева воздухонагревателей доменный газ на предприятиях ЧМ РФ используется в количестве 31,8% (2015 г.). По предприятиям этот показатель сильно не отличается и колеблется в пределах 1,5%. Исключение в доменных цехах: ПАО «МЕЧЕЛ» — 34,7%, ПАО «ЗСМК» — 36,2%, ПАО «Надеждинскиий МЗ — 39.2%; АО «СЧПЗ» — 48,2%.

Доменный колошниковый газ, выходящий с доменной печи, содержит колошниковую пыль. Состав и количество колошниковой пыли зависит от много факторов. Вынесено пыли с колошниковым газом при производстве чугуна на доменных печах предприятий РФ в 2015 году — 892,0 тыс. тонн. Уловлено — 667,7 тыс. тонн, что составляет 74,9%. В уловленной пыли содержание Fe — 39,1%.

В расчете на 1 тонну чугуна вынос пыли составляет 17 кг/т чугуна. Вынос пыли имеет широкий диапазон по доменным цехам. Так, самый высокий вынос пыли с колошниковым газом имеется на АО «Уральская Сталь» — 54,7 кг/т чугуна; ПАО «Тулачермет» — 43,5. Самый низкий показатель на ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ» ЧерМК — 5,56 кг/т чугуна.

Доменный шлак является вторым товарным продуктом доменного процесса. В 2015 году было выпущено с доменных печей предприятий РФ 17,788 млн. тонн жидкого шлака. На гранулирование было подано 5,802 млн. тонн (32,6%). Использовано на производство изделий — 5,3 млн. тонн. Доменного шлака было слито в отвал 2759,6 тыс. тонн (15,5%), сдано на сторону — 3859,6 тыс. тонн (21,7%). Доменный шлак гранулируется на ПАО МЕЧЕЛ» — 100%; АО «Уральская Сталь» — 65,7%; ОАО «ММК» — 41,2%; ПАО «Тулачермет» — 34,5%.

8. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Программа развития доменного производства на металлургических предприятиях России связана с техническим состоянием непосредственно доменных печей (система охлаждения, футеровка), оборудованием нижней и верхней загрузки, качеством железорудного сырья и металлургического кокса, отработкой продуктов плавки, логистикой поставки сырья и жидких продуктов плавки, параметрами комбинированного дутья.

За период 2011–2016 год в период капитальных ремонтов основные технические решения были направлены на повышение длительности эксплуатации доменных печей без проведения капитальных ремонтов II разряда не менее 12–15 лет. Мероприятия при проведении ремонтов сводились к следующему:

1. Использование при футеровке горна и лещади современного дизайна с применением огнеупорных углеродистых материалов и керамического стакана. Производители огнеупорных материалов горна и лещади — крупные зарубежные компании Западной Европы, Северной Америки и Азии.
2. Применение в системе охлаждения доменной печи чугунных холодильников с шаровидным графитом, вертикальных и горизонтальных медных холодильников в зонах с повышенной тепловой нагрузкой (заплечики, распар, низ шахты), особенно на доменных печах применяющих технологию комбинированного дутья с использованием кислорода высоких параметров (до 32%) в горячем дутье (до 1250°С), пылеугольного топлива и природного газа.
3. Применение в системе охлаждения химочищенной воды в замкнутом цикле с высокими параметрами по давлению и расходу.
4. Установка и освоение работы загрузки железорудных материалов и металлургического кокса в доменные печи бесконусными загрузочными устройствами
5. Установка конструкций основных и транспортных желобов для использования неформованных бетонных масс при отработке продуктов плавки на горизонтальных литейных дворах, оборудованных гидравлическим оборудованием, системой газоочистки от мест выбросов газа и пыли при выпуске чугуна и шлака.
6. Применение современных леточных масс и бетонных материалов для футляров чугунных леток доменных печей.
7. Применение современных средств контроля, отображения и математической обработки информации доменного процесса с помощью вычислительной техники последних поколений.
8. Разработка и внедрение локальных автоматических систем управления технологическим процессом с использованием математических моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные направления развития доменного производства до 2020–2022 года в России:

- ОАО «ЕВРАЗ НТМК». Строительство и освоение современной доменной печи объемом 2200 м^3 с использованием достижение науки и техники в металлургической отрасли отечественных и зарубежных крупных компаний.
- ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ» ЧерМК. Проектирование, строительство и освоение современной доменной печи объемом до 3200 м^3 с использованием в доменной шихте окисленных окатышей до 60%. Проведение капитальных ремонтов I — II разрядов (по графику) доменных печей комбината.
- ОАО «НЛМК». Строительство, ввод в эксплуатацию и освоение технологии доменной плавки на высоких параметрах комбинированного дутья с использованием пылеугольного топлива до 200 кг/т чугуна на доменных печах ДП-6, ДП-7.

- ПАО «ММК». Проектирование, строительство, ввод в эксплуатацию и освоение новой аглофабрики на производственную мощность 5,0 млн. тонн агломерата в год. Проведение капитальных ремонтов (по графику) основных агрегатов доменного цеха.

- ПАО «Тулачермет» Ввод в эксплуатацию и освоение доменной печи № 1. Проведение капитальных ремонтов I–II разрядов доменных печей № 3 и № 2. Освоение работы доменного цеха с поставкой жидкого чугуна в сталь-прокатное производство.

- Металлургические предприятия. Проектирование и строительство современных воздухонагревателей с купольными горелками (конструкции «Калугин»).

- Металлургические предприятия. Проектирование сухих газоочисток колошникового газа доменных печей .

- Замена холодильников в доменной печи. Для обеспечения длительной работы печи в зонах с повышенными тепловыми нагрузками рассматриваются холодильники чугунные с шаровидным графитов и двухрядным расположением охлаждающих труб, медные вертикальные, медные горизонтальные.

- Футеровка горна и лещади доменной печи должны обеспечивать высокую стойкость к различным воздействия жидких продуктов плавки, газам, цинку и щелочам. При рассмотрении дизайна футеровки предусматривается использовать супермикропористых углеродистых материалов в комбинациях с керамическим стаканом от производителей зарубежных компаний.

- Профиль и футеровка заплечиков, распара и низа шахты доменной печи должна обеспечивать формирование гарнисажа в условиях заданных газодинамических режимов ведения доменной плавки на железорудном сырье и металлургическом коксе металлургических предприятий.

- Футеровка горна, леточная масса и система охлаждения в районе чугунных леток должна обеспечивать длительную работу доменной печи при заданной длине летки с равномерным выходом продуктов плавки при различной производительности. Решение этих вопросов связано с использованием в горне огнеупорных материалов высокого качества, леточными массами и оборудованием по открытию и закрытию чугунной летки с гидравлическим приводом.

- Средства контроля процессами в доменной печи и внешними параметрами комбинированного дутья, загрузки сырья и работой оборудования должны иметь высокую точность и длительную эксплуатационную надежность

- Вычислительная техника и математическое обеспечение должны обеспечивать информацией о проходящих процессах и выдавать рекомендации управляющему персоналу по воздействию на процессы не интуитивно, а с помощью математической обработки от источников измерений.

Основное развитие доменного производства в 1 половине 21 века будет связано:

1. Повышение использования природного газа в доменной печи за счет его подогрева и комбинирование с кислородом.
2. Выполнение капитальных ремонтов и строительства современных воздухонагревателей с купольными горелками разработки фирмы «Калугин».
3. Строительством современных установок по использованию пылеугольного топлива в доменном процессе.
4. Применения супермикропористых огнеупорных материалов в горне доменных печей с использованием керамических стаканов с современных материалов.

5. Применение современных систем охлаждения с использованием новых поколений холодильников для ДП (медных, чугунных с шаровидным графитом).
6. Применение плоских конструкций литейного двора с бетонными укрытыми желобами и аспирацией мест выброса пыли. Установка оборудования по обслуживанию литейных дворов оборудованием с гидравлическим приводом.
7. Установкой на доменных печах БЗУ с современными средствами за технологическим процессом и АСУ.
8. Строительством сухих газоочисток и выводом из эксплуатации отстойников мокрых газоочисток.
9. Реконструкции шихтоподач оборудованных вагон-весами на конвейерные с отсевом мелких фракций.

А.Д. Зражевский, ОП «Укрметаллургпром»

ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО УКРАИНЫ

Объединение предприятий «Укрметаллургпром», совместно с металлургическими предприятиями «Евраз ДМЗ им. Петровского», «АрселорМиттал Кривой Рог» и ПАО «Запорожсталь» в 2015–2016 гг. провели 3 Международные конференции по коксо-агло-доменному производствам. Если подвести итоги по содержанию этих конференций, а также результаты работы указанных производств за 2015 г. и 9 месяцев 2016 г., то по достижениям, возникшим проблемам и путях их преодоления в доменном производстве мы отмечаем следующее:

1. В Украине за 9 месяцев 2016 г. произведено 18 млн.т чугуна против 16 млн.т за соответствующий период прошлого года.
2. В 2010 г. на всех металлургических предприятиях Украины была принята программа полного замещения природного газа на пылеугольное топливо.
3. Полностью были реализованы новые инвестиционные проекты в суммах от 60 до 100 млн.$ по освоению технологии вдувания ПУТ на предприятиях: Алчевском, «Запорожсталь», Мариупольском им. Ильича, Днепровском им. Дзержинского.
   Оборудование для помола, подготовки, смешивания углей и подачи смесей ПУТ было поставлено в 4 доменных цеха фирмой «Кюттнер», китайское фирмой Минметалз — на МК им. Ильича, фирмой Пауль Вюрт — на Днепровский МК им. Дзержинского.
4. В стадии освоения технологии вдувания ПУТ находятся доменные цеха «АрселорМиттал Кривой Рог» (ДП-9, по контракту с Даниэли Корус), ЕМЗ (оборудование фирмы Кюттнер) и планируется переход на эту технологию в МК «Азовсталь» — с использованием оборудования фирмы Кюттнер.

5. Наилучшие показатели по расходу кокса 381 кг/т при расходе ПУТ 151 кг/т был достигнут в доменном цехе МК «Запорожсталь» по итогам работы в 2013 г.
6. Лучшее качество кокса в Украине было достигнуто по итогам его производства за 2013-2014 гг. в Алчевске. Горячая прочность составила 59,14% — 62,01%, при М10 = 4,22 — 6,3; сере < 0,9%. Его потребление в ДЦ Алчевского меткомбината находилось в пределах 404,3 — 416,6 кг/т чугуна, а ПУТ 133,4 — 146 кг.т.

Таковы основные положительные итоги работы украинских коксохимиков и доменщиков за 2013–2016 (9 месяцев) годы. Дополнительно хотелось бы отметить уникальный опыт «пионера» технологии вдувания ПУТ — Донецксталь-МЗ». В доменном цехе этого завода на двух печах, при вдувании ПУТ в 2013 г. — 136 кг/т, выплавка чугуна велась на 100% окатышей СевГОКа с основностью до 0,5. Для стабильности шлакового режима и возможности обеспечения устойчивого режима производства потребление известняка составляло 220-230 кг/т чугуна при содержании железа в окатышах 61,9%. Их работа и совместный опыт с УХИН были отмечены государственной премией Украины. Однако следует особо отметить 2 вынужденных следствия в этой технологии, требующих учесть:

1) необходимость приведения качества украинских окатышей до лучших мировых показателей по прочности и основности;
2) отрицательное влияние окатышей на стойкость футеровки и системы охлаждения, а в целом — на длительность кампании доменных печей.

Отдельная тема, по которой также имеется положительный опыт украинских доменщиков (особенно — в «Донецксталь-МЗ», ЕМЗ и «АЗОВСТАЛЬ») имеет отношение к промежуточным ремонтам рабочего профиля доменных печей и обеспечению газоплотности методами шоткретирования и гроутинга. Достаточно отметить, что вопросы уборки отскока огнеупоров, настылей и гарнисажа тесно связаны с технологией подготовки, ведения ремонта и задувок печей. Более детально этим опытом могут поделиться присутствующие доменщики предприятий Украины.

Кроме указанных выше положительных сдвигов в технологии доменного производства следует отметить и серьезные достижения по современным ремонтам на наших предприятиях. Лучшие решения:

1) конструкции и высокое качество огнеупоров металлоприемников ДП-6, 8 «АрселорМиттал Кривой Рог», ДП-5 ЕМЗ, ДП-1 Алчевского меткомбината;
2) конструкция и система охлаждения низа доменной печи № 1 Алчевского меткомбината по проекту Даниэли Корус;
3) применение медных холодильников и современных огнеупоров на доменных печах — для продления кампании низа шахты, распара и заплечиков, поставленных фирмами Китая, Пауль Вюрт и Даниэли Корус;
4) установка современных воздухонагревателей с выносной камерой горения конструкции Калугина;
5) проекты и оборудование по снижению вредных выбросов в коксо-агло-доменных производствах;
6) применение современных систем контроля состояния низа шахты и заплечиков (остаточной толщины футеровки и тепловых нагрузок) в МК «Запорожсталь» и на ДП-1 Алчевского МК.

Если обобщить проблемы и новые задачи в доменных цехах Украины, то их содержание выразилось в следующем:

1) на наших доменных печах, при выполнении капитальных ремонтов до 2011 г. у всех проектных организаций отсутствовал опыт воплощения инженерных и конструктивных решений по печи, ее зонам и участкам, огнеупорам и системам охлаждения для обеспечения перехода на технологию вдувания ПУТ. Отставание до сих пор сохраняется не только в этом, но и в научном содержании опыта решения проблем выбора рациональных составов смесей по маркам углей, обеспечения их полного сжигания, освоения новых технологических приемов распределения ЖРС и газа по сечению печи, а особенно — в обосновании требуемых теплотехнических характеристик и стойкости огнеупоров, охлаждающих элементов, схем охлаждения и газоплотности многослойной структуры «футеровка-холодильники-зазоры-бронь»;
2) все фирмы, которые поставили оборудование подготовки и вдувания ПУТ не обеспечивали услуги профессиональных доменщиков по освоению технологии и выводу печей на проектный режим

вдувания ПУТ, а в отдельных случаях имели место серьезные ошибки в проектных решениях, поломки и несоответствие режимных и требуемых параметров работы в комплексах ПУТ (примеры могут привести представители МК им. Ильича).

Так как сохранность огнеупорной футеровки должна обеспечиваться все время кампании — с начала задувки, обязательными в проектах реконструкций следует признать средства и системы:

- Диагностики остаточной толщины футеровки;
- Предупреждение прогара фурм и попадания воды на футеровку;
- Контроля наполнения — опорожнения горна;
- Контроля работы системы охлаждения.

К числу технологических мероприятий по ослаблению износа относятся:

1. Применение программы загрузки, увеличивающей активную площадь движения чугуна и шлака по сечению горна (уменьшение объема малоподвижных материалов за счет лоткового загрузочного устройства, подача кокса в центр печи и др.);
2. Снижение интенсивности хода;
3. Закрытие фурм;
4. Повышение интенсивности охлаждения.
5. Организация рационального графика выпусков.

К числу технологических мероприятий по защите рабочего профиля относятся:

1. Вдувается титансодержащий порошок через фурмы, для чего имеются передвижные установки и технология быстрой защиты ослабленных областей футеровки (установки Велко). К другим мероприятиям относится загрузка титансодержащих окатышей, или дробленного титанистого шлака, или титансодержащих брикетов, или ввод соответствующих концентратов в аглошихту;
2. Закачка специальных масс через летки, фурмы, и за бронь (гроутинг);
3. Снижение интенсивности хода с усилением расхода воды на охлаждение и временное закрытие отдельных фурм для наведения гарнисажа.

Для слежения за динамикой износа профиля применяются системы контроля футеровки: по закладным термопарам, путем экспертиз теплотехническими и ультразвуковыми установками, с использованием специальных керамических «стержней износа» и зондов.

А.Н. Адамчук, ГК «МетПром»

ПРАКТИКА РЕАЛИЗАЦИИ КРУПНЫХ ПРОЕКТОВ В МЕТАЛЛУРГИИ

Группа компаний «МетПром» динамично развивающееся предприятие, которое с момента основания уже 24 года занимается проектированием и строительством новых, реконструкцией существующих металлургических мощностей. За это время МетПром успел накопить значительный и, в некоторой степени, уникальный опыт участия в различных проектах в черной металлургии. Вместе с приобретенным опытом изменялась и модель бизнеса предприятия. По нашему мнению в настоящее время наиболее востребован подход «под ключ», который включает в себя проектирование, поставку и строительно-монтажные работы. Такая схема реализации проектов снимает значительные риски с заказчика, позволяет сократить сроки инвестиционной фазы, снизить капитальные затраты. Сегодня МетПром стремится выступать в крупных проектах в роли генерального подрядчика «под ключ».

Данный результат достигается, благодаря применению современных подходов к организации производства работ и наличию в составе Группы высококвалифицированных инженеров и специалистов, количество которых превышает 900 человек.

На данный момент ГК «МетПром» участвует в реализации трех крупнейших металлургических проектов в России, играя роль Генерального/ключевого подрядчика:

- ПАО «Тулачермет» — строительство литейно-прокатного комплекса мощностью 1,5 млн.т. сортового проката;
- ЗАО «Лысьвенский металлургический комбинат» — строительство листопрокатного комплекса мощностью 820 тыс.т листового проката;
- ОМК, АО «Выксунский металлургический комбинат» — строительство цеха по производству и финишной отделки труб.

Помимо вышеперечисленных объектов МетПром осуществляет строительство «под ключ» абсолютно нового современного завода по производству белой жести на территории Республики Беларусь, работает над комплексом ДП№7 ЕВРАЗ НТМК, ведет переговоры по целому ряду других проектов.

Основными направлениями деятельности компании являются:

- осуществление проектов «под ключ» (EPC-контракт);
- работа на условиях фиксированной цены или «cost plus»;
- строительство и модернизация предприятий черной металлургии;
- генеральное проектирование металлургических объектов;
- поставка и монтаж технологического и вспомогательного оборудования;
- поддержка заказчиков во взаимодействии с финансовыми институтами.

Стоит отметить, что сосредоточение в руках одного исполнителя всего комплекса работ позволяет сформировать индивидуальную стратегию и подход к реализации проекта, обеспечивающий гарантию надежности и качества выполненных работ и оказанных услуг, а также получить экономию временных и человеческих ресурсов. Помимо этого реализация проектов «под ключ» минимизирует время согласования решений, за счет изменения цепочки взаимоотношений:

Генподрядчик ↔ Заказчик ↔ Генпроектировщик

на

Заказчик ↔ Исполнитель

В последнем случае существенно упрощается контроль над конечным результатом.

В настоящее время в портфеле ГК «МетПром» находится несколько EPC-контрактов, один из которых — строительство завода по производству холоднокатаного листа и белой жести в г. Миоры Республики Беларусь был реализован с привлечением МетПромом банковских кредитов на заказчика для реализации данного проекта. Общая сумма кредитов превысила 100 млн. евро. Этот практический опыт позволяет применять его и к другим иностранным проектам, реализуемым группой.

Для более детального понимания, стоит пояснить, что под понятием «инвестиционный проект» мы подразумеваем любое новое строительство, реконструкцию существующих мощностей, крупный капитальный ремонт, и выделяем для себя три основных фазы:

- Прединвестиционная — всестороннее изучение бизнес идеи;
- Реализация — это создание непосредственно нового объекта и/или выполнение комплекса работ на объекте;
- Эксплуатация — это жизненный цикл объекта.

Каждому из этапов характерны свои риски, к примеру, на первом они в большей степени относятся к внутренним, которые компания может гарантированно минимизировать. Этап реализации, по сути, является определяющим, именно в этот период выбираются исполнители проекта (генпроектировщик, генподрядчик, поставщик основного технологического оборудования), закладываются определенные технологические и строительные решения, которые прямо связаны с затратами на СМР, операционными и прочими расходами. На этапе эксплуатации ярко могут проявиться, как промахи, так и положительные результаты, заложенные на этапе проектирования и строительства, зачастую, в данный период приходится устранять ошибки, нести дополнительные расходы, что в целом негативно влияет на показатели проекта.

Особо внимания в нашем рассмотрении занимает фаза Реализации, как наиболее определяющая будущий результат. Не вызывает сомнения, что насколько слажено в целом работают все участники проекта зависят сроки и стоимость строительства. Уменьшение количества участников существенно влияет на риски и дает возможность заказчику сформировать более комфортные требования заказчику к готовому результату.

Ранее, в годы плановой экономики, существовали мощные специализированные тресты, обладавшие огромными ресурсами в различных сферах, проектировании, выполнении строительно-монтаж-

ных работ, такие как ГИПРОМЕЗ, Домнаремонты, Энергосталь, Металлургпрокатмонтаж и пр., что при наличии единого центра планирования позволяло обеспечить равномерное распределение нагрузки на каждого участника. Существовавшая система была достаточно успешна и позволяла реализовывать любые масштабные проекты в условиях единого органа управления отраслью и смежниками. В настоящее время меткомбинаты самостоятельно определяют инвестиционные программы, проводят крупные капитальные ремонты, в значительной степени опираясь на существующие возможности рынка специализированных строительно-монтажных работ, который в свою очередь представлен независимыми некрупными участниками рынка в большинстве своем с численностью до 150 человек. На рисунке 1 приведена схема «эволюции» форм инвестпроектов.

Рис. 1. Развитие форм инвестпроектов во времени.

Зарубежная практика реализации крупных объектов на сегодняшний день в большей степени соответствует нашим текущим реалиям. Так как исторически иностранные предприятия не были объединены под руководством единого министерства или акционера. Сегодня уже сложились определенные в подходы в реализации подобных крупных проектов, где проект реализуется силами одного, максимум двух исполнителей. Ниже приведены общепринятые названия данных подходов.

- EPC/Turnkey — имеет такие же характеристики, что и реализация «под ключ»;
- EPCF — осуществление работ на условиях EPC с дополнительной услугой в виде финансирования;
- EPCM — EPC-контракт в комплекте с полным управлением проектом;
- BOT (Build-Operate-Transfer) — условия EPCM и управление созданным объектом с последующей передачей Заказчику.

Кроме приведенных выше международная федерация инженеров-консультантов (FIDIC), которая основной целью ставит разработку типовых форм контрактов, регулирующих взаимоотношения участников крупных, в том числе и международных, инвестиционно-строительных процессов, использует следующие термины: Gold, Silver, Yellow, Red, Orange Books, что, по факту, является различными подвидами и аналогами EPC-контрактов.

Из представленного анализа, очевидно, что существовавшая ранее модель исполнения крупных проектов потеряла свою жизнеспособность вследствие изменения экономических условий, но окончательной трансформации взаимоотношений заказчика и подрядчиков к устоявшемуся зарубежному опыту не произошло.

В условиях сложившейся ситуации и, разделяя проблемы инвесторов строительства промышленных объектов, Группа компаний «МетПром», являясь пионером на российском рынке, предлагает реализацию проектов на условиях «под ключ». Структура данного подхода представлена на рисунке 2. (синим цветом выделены работы, выполняемые собственными силами).

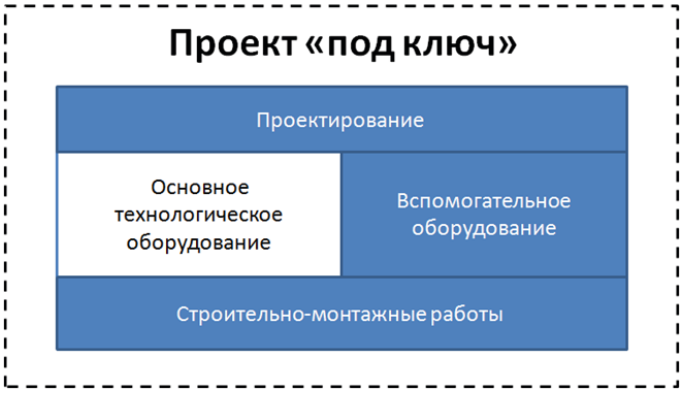


Рис. 2. Бизнес-модель ГК «МетПром».

Реализовать приведенную выше бизнес-модель позволяют имеющиеся ресурсы группы: проектный институт, в составе которого более 200 человек, строительно-монтажный трест (свыше 600 человек) и структурное подразделение по управлению проектами — 100 человек.

Преимуществами работы с МетПром по предлагаемой схеме являются:

- работа в направлении «value engineering» (постоянной оптимизации стоимости строительства);
- гарантированная возможность выбора поставщика основного технологического оборудования, даже в составе EPC-контракта;
- скорость реализации проектов, достигаемая за счет совмещения процессов;
- фиксированная стоимость или cost-plus;
- использование существующих ресурсов Заказчика;
- отсутствие необходимости заказчику создавать и сохранять избыточные специализированные мощности;
- наличие центра ответственности за конечный результат.

Подводя итоги, необходимо отметить тот факт, что выполнение проектов ГК «МетПром» в формате «под ключ» обеспечивает Заказчику полную ответственность за конечный результат, включая сроки и стоимость.

А.А. Полинов, А.В. Колосов, А.В. Павлов, ПАО «ММК»
О СОСТОЯНИИ И ПЕРСПЕКТИВАХ ПЕРВОГО ПЕРЕДЕЛА ОАО «ММК» 44

В.Д. Осипенко, НПП «ДЭС»
ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРИОРИТЕТНОГО ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ АГЛО-ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА 48

Е.Н. Виноградов, А.А. Калько, Е.А. Волков, ПАО «Северсталь»
А.С. Нестеров, Н.Г. Иванча, ИЧМ НАН Украины
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С НИЗКИМ ВЫХОДОМ ШЛАКА 51

М.Н. Суворов, «Paul Wurth»
СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ДЛЯ РАБОТЫ С ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ КАМПАНИИ 59

М.В. Чукин, С.К. Сибагатуллин, А.С. Харченко, Л.Д. Девятченко, МГТУ им. Г.И. Носова
А.А. Полинов, М.А. Семенюк, В.А Бегинюк, ОАО «ММК»
ВЫЯВЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЗАГРУЗКИ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ, ОСНАЩЕННУЮ КОМПАКТНЫМ БЗУ ЛОТКОВОГО ТИПА 68

И.Э. Шепетовский, Р.И. Нуриев, К.В. Мясников, Е.В. Иванов, Д.А. Набока,
ПАО «Косогорский металлургический завод»
ДОМЕННАЯ ПЛАВКА ВЫСОКОЧИСТОГО ЧУГУНА НА РУДНОЙ ШИХТЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ ДО 100% КИСЛЫХ ОКАТЫШЕЙ 79

Раздел II
ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА

В.Н. Титов, Л.С. Ивлева, А.А. Пишикин, ПАО «НЛМК»
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЛКИХ ФРАКЦИЙ АГЛОМЕРАТА И КОКСА В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ 840

А.А. Ткач, В.А. Петренко, А.Я. Ткач, ПАО «Днепрогидромаш»
ВЫПУСК ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ ИЗ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ХОД ПРОЦЕССА. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ВОПРОСА 91

В.А. Курганов, Д.В. Парамонов, А.В. Федько, ОАО «Черметинформация», ООО «ТОР»
НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ДОМЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЧУГУНОВ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ 97

А.А. Акбердин, А.С. Ким, Р.Б. Султангазиев, ХМИ им. Ж. Абишева
MgO ИЛИ B_2O_3 В ДОМЕННЫХ ШЛАКАХ? 102

И.Г. Товаровский, А.Е. Меркулов, ИЧМ НАН Украины
НОРМАТИВНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ НА РАСХОД КОКСА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ 111

А.А. Полинов, А.В. Колосов, А.В. Павлов, ПАО «ММК»

О СОСТОЯНИИ И ПЕРСПЕКТИВАХ ПЕРВОГО ПЕРЕДЕЛА ОАО «ММК»

Подразделения первого передела ОАО «ММК» в текущем (2016 году) имеют следующий состав и показатели:

Агломерат:

- аглофабрика № 2 (машины 5,6,7,8,13 S спекания 75 м^2 каждая, работают с уд.пр. 1,206т/м^2*час, 0–5мм — 8,5%)
- аглофабрика №3 (машины 9,10,11,12, S спекания 75 м^2 каждая, работают с уд.пр.1,343т/м^2*час, 0–5мм — 8,2%)
- аглофабрика №4 (машины 14,15,16,17, S спекания 95,2 м^2 и S охлаждения 78,4м^2, работают с уд.пр. 1,318т/м^2*час, 0–5мм — 10,6%)
- производительность в номинальные сутки — 31 918 т;
- удельный расход топлива — 42/46 кг/т агломерата (лето/зима).

Кокс:

На КХП ОАО «ММК» имеется 9 коксовых батарей (средний возраст 36,0 лет) проектной мощностью 6 600 тыс. тонн кокса в год. На 2016 год производственные мощности по 6% валовому коксу составят 5 838 тыс. тонн. По коксовым батареям:

- КБ 1,2,3,4 — 2 198 тыс. тонн/год (проектная мощность по 0,60 млн.т/год);
- КБ 7,8 — 1 619 тыс. тонн/год (проектная мощность по 0,93 млн.т/год);
- КБ 9бис — 831 тыс. тонн/год (проектная мощность по 0,93 млн.т/год);
- КБ 13,14 — 1 190 тыс. тонн/год (проектная мощность по 0,69 млн.т/год);
- Качество кокса по М 10 — 8,1%; М 25 — 88,1%; W — 3,7%; Ас — 12,6%; CSR — 50,0% ; CRI — 32,5%.

Ежегодно для поддержания производственных мощностей перекладывается до 30-ти простенков по разным коксовым батареям.

Чугун:

Доменный цех ОАО «ММК» состоит из 8-ми ДП (1-8 объемом по 1370 м^3, 9,10 — по 2014 м^3, 3,5 — выведены из эксплуатации). Суточная производственная мощность цеха на настоящий момент около 30 500 тонн/сут. Максимальной производительности доменный цех в «послекризисные 90-е годы» достиг в 2013 году — выплавлено 10 280 092 тонны чугуна. На ближайшую перспективу не планируется изменение состава цеха.

В 2015-м году выплавлена 600-миллионная тонна чугуна с момента пуска доменного цеха.

За последние 10 лет реализовано следующее:

- в 2006–2007 годах на аглофабриках №2,3 введены в эксплуатацию кольцевые охладители агломерата и грохота холодного агломерата с получением стабилизированного охлажденного до 100 ° агломерата;
- реконструированы сероулавливающие установки СУ 3,4, построена новая СУ 2;
- в КЦ КХП в 2009 — 2010 г.г. выполнен КР коксовых батарей №№ 3-4;
- в ДЦ с 2006 по 2010 годы последовательно на ДП №№ 4,6,9,10,2 установлены БЗУ компании «Paul Wurth».

Разработана **«Программа мероприятий по повышению эффективности первого передела»**.

Она состоит из ремонтной и инвестиционной частей и в ближайшей перспективе призвана повысить эффективность работы первого передела, наращивание производственных мощностей ДЦ. Значительное увеличение мощностей без увеличения объема ДП реализуется за счет организационно-технических мероприятий в ДЦ и в подразделениях, обеспечивающих ДЦ ресурсами.

«Программа» предусматривает как увязывание материальных потоков, так и управление финансовым планом капитальных вложений по направлениям:

Доменные печи.

За последние 4 года проведены КР I разряда на доменных печах 6,8, КР III бис разряда на ДП № 9 с восстановлением огнеупорной футеровки шахты методом шоткретирования. Данный способ позволяет минимизировать раздувочный период и обеспечить более скорый вывод на заданный уровень производительности, формирование изначально рабочего профиля, не «ожидая» его разгара, который может происходить неконтролируемо, в зависимости от режима работы печи.

Концепция проведения ремонтов ДП предусматривает проведение КР I разряда одного в 15 лет с проведением промежуточного КР III бис разряда с восстановлением футеровки шахты. Кампания ДП обеспечивается совершенствованием систем водоподготовки, использованием высококачественных огнеупоров. Для улучшения работы системы охлаждения во время КР ДП устанавливаются фильтры тонкой очистки, а для охлаждения фурм обеспечивается повышение давления воды до 7,4 ати (вместо 4,0–4,5).

На сегодняшний день с 04.11. на ДП № 10 проводится КР I разряда. Далее в течение 2017–2021 годов планируется проведение КР I разряда последовательно на ДП 1,2,4,7,8,9. На ремонтируемых ДП запланирована реконструкция газоочисток для обеспечения возможности повышения давления на колошнике до 2,0 ати.

В 2019 будет принято решение о строительстве новой ДП с выводом из работы лишних мощностей или проведении КР существующих.

Много внимания уделяется разработке АСУ ТП. Программы направлены на оперативное формирование прогнозных экономических показателей по выбранным сценариям в зависимости от качества и стоимости используемых в производстве ресурсов. При помощи модельных систем существует возможность предварительно оценить применимость того или иного сценарного шихтового режима работы по выбранным технологическим критериям. Другим направлением является разработка систем контроля, прогноза и управления технологическим процессом, в том числе реализована система управления режимами нагрева воздухонагревателей, что позволило повысить температуру горячего дутья на 10 °.

Воздухонагреватели.

Согласно программы повышения температуры горячего дутья вместо КР 1 разряда запланированы реконструкции с заменой на воздухонагреватели типа «Калугин». В настоящее время начато строительство воздухонагреватели 23бис для ДП №7. Отмечу, что в настоящий момент в доменном цехе воздухонагреватели типа «Калугин» эксплуатируются на ДП 1 с 1998 года и положительно себя зарекомендовали. В ближайшие 5 лет планируется провести реконструкцию В/Н на ДП № 7,8,9,10.

Для устранения «коротких замыканий» планируется проведение торкретирования камер горения.

За счет проводимых мероприятий планируется повысить температуру горячего дутья по цеху с 1130 до 1190 °С.

Литейные дворы. Отработка продуктов плавки.

Начиная с 2015 года, в доменном цехе при проведении КР ДП планируется проведение реконструкций литейных дворов — строительство горизонтальных с аспирацией литейного двора и установкой гидравлических горновых машин литейного двора. На настоящий момент эта концепция реализована на ДП №№ 6,9, в процессе реализации — на ДП № 10.

На настоящий момент в доменном цехе перешли на применение безпековых леточных масс, обеспечивающих требуемые показатели работы леток в условиях роста удельной производительности и отработки продуктов плавки.

Для улучшения условий труда и обеспечения графика отработки продуктов плавки реализуется программа повышения стойкости главных горновых желобов с продлением кампании желоба до 1,0 млн.тонн.

Как мероприятие, обеспечивающее ровность работы доменных печей в периоды неритмичной работы потребителей чугуна прорабатывается вопрос строительства двух чугуноразливочных машин общей производительностью 250 тонн/час.

Аглофабрика.

В ноябре 2016 года подписан контракт с компанией «SinoSteel» на проектирование и поставку оборудования для строительства аглофабрики № 5. После пуска аглофабрика № 4 выводится из работы. Проектная производительность новой фабрики 5,5 млн.тонн агломерата в год. Предусмотрены 2 агломашины, площадью спекания по 300 м^2, с шириной паллеты 4,0 м, высота спекаемого слоя — 700 мм, удельная производительность 1,158 т/м^2*ч, содержание мелочи 0–5 мм в бункерном агломерате — 5%, охладитель линейного типа площадью 336 м^2.

Ввод новой аглофабрики позволит:

- увеличить «долю тонких» в аглошихте фабрики и получить содержание железа в агломерате до 58%, при основности 1,65 ед.;
- обеспечить объем производства агломерата на 1,5 млн.тонн/год;
- увеличить производительность ДЦ, повысить коэффициент полезного использования железа и снизить себестоимость чугуна;
- снизить экологическую нагрузку.

Коксохимическое производство.

Для обеспечения баланса производства — потребления кокса планируется:

- 2018–2019 г.г. (пуск 2020 год) — строительство УСТК моноблочного типа на КБ № 13,14 с комплексом мероприятий на ПВЭС и ЦЭС.
- 2020–2021 г.г. (пуск 1-го блока 2022 год) — опережающее строительство КБ № 12 с УСТК мощностью 1,2 млн.т/год валового кокса 6 % влажности. Варианты конструкции коксовой батареи прорабатываются;
- 2022–2023 г.г. — реконструкция КБ № 8 со строительством УСТК;
- 2023 год — остановка КБ № 2;
- 2024–2025 г.г. — реконструкция КБ № 7 со строительством УСТК;
- 2026 год — остановка КБ № 1;
- 2026 год — реконструкция КБ № 13;

- 2027 год — реконструкция КБ № 14;
- 2028–2029 г.г. — реконструкция КБ № 9;
- 2029 год — остановка КБ № 3;
- 2030 год — остановка КБ № 4;

ТВД ПВЭС, кислородное производство.

Одним из важнейших факторов повышения эффективности эксплуатации и производительности доменных печей является обеспечение дутьем высоких параметров.

В течение 5 лет планируется замена 4-х ТВД на новые, которые позволят обеспечить повышение давления на колошнике ДП до 1,8–2,0 ати. Замена еще 3-х ТВД планируется произвести в последующие 5 лет.

В ноябре 2018 года планируется пуск нового кислородного блока, благодаря чему содержание кислорода в дутье возрастет до уровня более 28,0 % от текущего 26,5–27,0 %.

ИТОГО:

Реализация «Программы мероприятий по повышению эффективности первого передела» позволит снизить расход кокса к 2030-му году до 400 кг/т и обеспечить рост объемов выплавки чугуна. Последнее позволит:

- обеспечить семью доменными печами потребность сталеплавильного передела и вывести из эксплуатации ДП № 7, сократив, таким образом, затраты;
- разработать и реализовать программу увеличения удельного потребления чугуна в сталеплавильном переделе, что снизит себестоимость стали и количество провалов при отдаче потребителям проката из ответственных марок стали;
- проработать вопрос использования ДП № 7 для переработки отходов производства с высоким содержанием цинка.

В.Д.Осипенко, ООО НПП «Днепроэнергосталь»

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРИОРИТЕТНОГО ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ АГЛО-ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Черная металлургия — капиталоемкая и трудоемкая отрасль промышленности. В последнее время ее развитие главным образом, осуществляется за счет интенсификации производства. Интенсификация аглодоменного производства заключается в применении в технологии природного газа, кислорода, повышенного слоя спекаемого пирога агломерата, повышения давления под колошником доменной печи, применение пылеугольного топлива и т.д. К сожалению, рост производства черной металлургии сопровождается значительным выбросом в атмосферу и водоемы.

Первое место по количеству выбросов в технологии черной металлургии занимает агломерационное и доменное производство. Выбросы от агломашины находятся в пределах 4 800 м^3/ч на 1 тонну производимого агломерата или 3 000–4 000 м^3/ч на активную площадь агломашины. Выход технологических газов в доменном производстве составляет от 2 000 до 4 000 м^3/ч на тонну выплавляемого чугуна.

Как известно, за счет технологических мероприятий можно сократить выбросы в небольших количествах, однако основными главными направлениями по защите атмосферы от выбросов все же остается оснащение металлургических агрегатов высокоэффективными газоочистными сооружениями.

Если в технологии металлургического производства наблюдается значительный научно-технических прогресс, то в создании высокоэффективных газоочистных сооружений наблюдалось значительное отставание. До начала XXI века в металлургии преимущественно применялись устарелые мокрые способы очистки газов, которые отличались большой энергоемкостью и низкой эффективностью очистки. Применение мокрых способов очистки газов приводили к образованию большо-

го количества загрязненных вод, которые необходимо очищать перед выбросом в открытый водоем или при возврате их на повторное использование. В настоящее время лицом практически каждого металлургического предприятия с замкнутым технологическим циклом является наличие шламонакопителей, где происходит накопление взвешенных частиц и отвод осветленных вод во внешние воды или на повторное использование. Анализ состояния и работоспособности шламонакопителей большинства металлургических предприятий показывает, что практически все они исчерпали свои возможности, и для продолжения производственной деятельности предприятий необходимо создание новых шламонакопителей. В действующих условиях инфраструктуры городов, в которых находятся предприятия, предоставить соответствующие площади не предоставляется возможным. Кроме того, учитывая возросшую стоимость земельных ресурсов, отвод и эксплуатация таких шламонакопителей может оказаться экономически не выгодным для существования самого предприятия. Сам же шламонакопитель является дополнительным нерегулируемым и не управляемым источником загрязнения атмосферы и водоема. Все попытки заменить мокрые способы очистки технологических и аспирационных выбросов черной металлургии на другие методы очистки были не совсем удачны. Сухие циклоны и другие инерционные аппараты отличаются большими габаритами и низкой эффективностью. Электрофильтры также не отвечали требованиям по эффективности очистки из-за особых специфических физико-химических свойств пыли аглодоменного производства (высокое удельное электрическое сопротивление).

В этой связи нами были предприняты попытки создать высокоэффективный малогабаритный и низкоэнергетический сухой способ очистки газа на основе фильтрации через специальные ткани. Первые опытные образцы таких фильтров были успешно испытаны и широко внедрены в черной металлургии на аспирации. Для использования таких фильтров для технологических газов необходимо было решить ряд вопросов, таких как: снижение температуры газа до эксплуатационных показателей работы фильтровальных материалов (250–260°С); создать эффективную систему регенерации; приспособить систему выгрузки пыли из фильтров к условиям гидравлики газоотводящего тракта (высокое давление в доменных печах, высокое разряжение в агломерационном производстве).

Длительные научно-исследовательские и опытные работы позволили в конечном итоге создать фильтр и газоочистную систему для очистки технологических газов агломерационной машины и доменной печи. Отличительные особенности такого рукавного фильтра с импульсной регенерацией (ФРИР) является высокая скорость фильтрации, эффективная система регенерации, работающая на низких давлениях сжатого воздуха и азота; эффективные системы выгрузки пыли из бункера аппарата при высоких значениях разрежения аппарата (до 15 000 Па). Эти особенности позволили разработать относительно малогабаритный фильтр, который может быть применен для условий действующих производств.

Первый такой фильтр для очистки агломерационных газов был построен на агломерационной фабрике «Чусовского металлургического завода». Промышленные испытания этого фильтра показали возможность применения такой конструкции фильтра при наличии соответствующего фильтровального материала, а именно масло- и влаго-отталкивающих тканей. Выбор соответствующей ткани производился совместно с немецкой компанией — производителем материала — BWF, с которой мы постоянно поддерживаем творческие и деловые отношения. В декабре 2014 года по нашим разработкам было смонтировано и запущено в эксплуатацию оборудование газоочистки на Богдановской обогатительно-агломерационной фабрике ПАО «Орджоникидзевский ГОК» на машине производящей сырье для выплавки металлургического марганца. За короткий период газоочистка была налажена и подтвердила возможность применения рукавных фильтров для очистки агломерационных газов. Достигнутая эффективность очистки газов до 10 мг/м^3, по нашему мнению, является самой эффективной в агломерационном производстве.

Итогом указанных выше работ, явилось создание газоочистки для агломерационных газов агломашин № 2, 3, 4, 5 ПАО «Запорожсталь». Отличительной особенностью этих газоочисток является схема газоочистной системы, которая позволяет применить рециркуляцию агломерационных газов после первой степени очистки (ФРИР-6000) для Еснижения выбросов СО (до 30%). Кроме того, в схеме газоочистки предусмотрена установка адсорбера для очистки газов от окисла серы за счет подачи известковой пушонки. После адсорбера для удаления продуктов серо улавливания предусмотрена установка

второй ступени (ФРИР-4500) очистки газов. В настоящее время проводятся работы по оснащению такой газоочисткой агломашин №1 и №6. Смонтированные газоочистные сооружения находятся в стадии пуско-наладки и ввода в эксплуатации.

В 2007–2009 годах нами проводились работы по рабочему проектированию и шефмонтажу и наладке сухой газоочистки доменных печей № 1, 2 «Косогорского металлургического завода» — доменной печи объемом 1000 м^3 выплавки переделки и литья чугуна, доменной печи объемом 500 м^3 выплавки товарного ферромарганца. В декабре 2009 года газоочистка была сдана в эксплуатацию. Схема газоочистной установки представляет собой газоход грязного газа, охладитель или корректор температур доменного газа, собственно газоочистка состоящая из пяти и девяти секций круглого сечения, дроссельной группы и газоходы чистого газа. Секции газоочистки представляют собой корпуса круглого сечения диаметром 3,2 м, которые внутри оснащены трубными досками для крепления фильтровальных рукавов. Внизу секции расположен бункер с узлом выгрузки пыли. Пыль выгружается поочередно с каждой секции на герметичный скребковый конвейер и подается в общий бункер приема пыли, из которого пыль автотранспортом перевозиться на переработку. Система регенерации рукавов снабжена специальным продувочным быстродействующим клапаном. Рабочей средой клапана служит азот, который подается с блока разделения воздуха. Общая площадь 583 м^2 при удельной газовой нагрузке 1,25 м^3/м^2×мин. Вся газоочистка работает в автоматическом режиме, начиная от охладителя доменного газа и заканчивая узлом выгрузки пыли из секции. Материалом фильтровальных рукавов служит специальная ткань из полифенилсульфидного волокна PTFE.

Следует отметить, что охладитель работает при подаче воды в систему специальными форсунками тонкого распыла. В связи с тем, что пыль при выплавке ферромарганца очень чувствительна к присутствию влаги, это приводило к такому явлению как интенсивное отложение пыли в газоходе грязного газа после охладителя. Поэтому газоочистка печи №2 была остановлена после проведения пуско-наладочных работ. Газоочистка печи № 1 работает до сих пор с показателями заложенными в проектной документации.

По результатам длительной эксплуатации сухих газоочисток доменных печей, нами разработан необходимый регламент для широкого внедрения сухих газоочисток доменных печей. Так, в 2014–2015 годах нами было разработано технико-экономическое обоснование (ТЭО) и основные технические решения (ОТР) строительства сухих газоочисток Мариупольского меткомбината «Азовсталь». В выводах ТЭО и ОТР подтверждается высокая экономическая и экологическая эффективность сухих газоочисток доменных печей. Учитывая наш большой опыт работы в разработке и внедрении газоочисток агломерационных машин и доменных печей, мы всегда готовы сотрудничать с предприятиями, имеющими агло-доменное производство.

Е.Н. Виноградов, А.А. Калько, Е.А. Волков, ПАО «Северсталь»
А.С. Нестеров, Н.Г. Иванча, ИЧМ НАН Украины

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С НИЗКИМ ВЫХОДОМ ШЛАКА

Уменьшение выхода шлака является одним из наиболее эффективных резервов сокращения затрат на выплавку чугуна, который реализуется, в первую очередь, за счет снижения удельного расхода кокса. При работе доменных печей с низким выходом шлака в условиях нестабильности рынка сырья и переменного спроса на металлопродукцию определяющее значение приобретает задача повышения устойчивости хода доменной плавки за счет обеспечения требуемого качества железорудного сырья, выбора рационального состава доменной шихты, рационального распределения различных видов шихтовых материалов по сечению доменных печей и оптимизации шлакового режима.

Известно, что основными видами подготовленных железорудных материалов являются агломерат и окатыши. По заключению отечественных и зарубежных специалистов наиболее приемлемым для доменной плавки является дробленый и отсеянный от мелочи агломерат. Однако ряд проблем — сложности спекания тонкоизмельченных железорудных концентратов, ограничения прочностных характеристик в зависимости от основности, сложности эксплуатации оборудования для механической обработки и классификации спека — ограничивают развитие агломерационного производства. В ряде зарубежных странах (Германия, Швеция, Финляндия) стараются исключить агломерацию из цепи подготовки сырья по экологическим соображениям.

Стремление повысить богатство железорудного сырья обусловило развитие процессов обогащения руд с получением высокосортных (до 68–70% железа), но весьма тонкоизмельченных и трудноспекаемых при агломерации железорудных концентратов. Более целесоо-

бразным оказалось окускование их окатыванием с последующим окислительным обжигом. Сложившаяся ситуация определила тенденцию развития технологии производства окатышей различных составов и свойств [1, 2]. Из всего их многообразия в практическом плане выделяются два вида, различающиеся содержанием кремнезема и флюсующим агентом. Это, так называемые, рядовые окатыши с содержанием SiO_2 от 5,5% до 11,0%, частично офлюсованные известью (CaO/SiO_2 = 0,4–0,8 ед.) и неофлюсованные окатыши с содержанием SiO_2 = 1,0–3,0% с добавками магнийсодержащих компонентов ($MgO:SiO_2$ = 0,4–0,8 ед.).

Существует мнение, сформировавшееся в начальный период производства и применения окомкованного сырья, что в целом окатыши, упрочненные окислительным обжигом, являясь генетически отличающимся от агломерата подготовленным сырьем для доменной плавки, обладают рядом преимуществ. При прочих равных условиях окатыши благоприятно влияют на газодинамические условия плавки, вследствие относительной равномерности гранулометрического состава и небольшого количества в них мелких фракций в исходном состоянии. Эффект влияния окатышей на газопроницаемость шихты в сухой зоне доменной печи пропорционален уменьшению количества мелочи в агломерате. При меньшем, как правило, содержании кремнезема в окатышах по сравнению с агломератом, существенно ниже и потребность в известняке для офлюсования комков либо, в целом, доменной шихты. Богатые железорудные концентраты, используемые для получения окомкованного сырья, обусловливают уменьшение выхода шлака и соответствующую экономию кокса. Экономический эффект усиливается с повышением содержания железа в окатышах, что связано, помимо уменьшения выхода шлака, с характером перераспределения железа между формирующимися в печи фазами. Однако надежды на высокую эффективность использования окомкованного сырья в доменных печах в виде частично офлюсованных рядовых окатышей с содержанием кремнезема 5,5–11,0% не оправдались. Опытные плавки и регулярная работа доменных печей с различным содержанием окатышей в шихте, оказались менее эффективными по сравнению с плавками на традиционно подготовленном сырье-агломерате.

Считалось, что это обусловлено главным образом недостаточной прочностью комков в условиях доменной печи [3, 4]. Комплексными исследованиями металлургических свойств показано, что заметное разупрочнение и, особенно, истираемость окатышей в ходе восстановительно-тепловой обработки в доменной печи имеет место и оказывает негативное влияние на характер и показатели плавки, когда окатыши слабо обожжены и прочность их составляет менее 120–150 кг на образец [5, 6]. Более веской причиной негативного влияния рядовых, даже достаточно упрочненных, окатышей на результаты доменной плавки являются их высокотемпературные свойства, проявляющиеся в ходе восстановительно-тепловой обработки [7, 8].

Особенностью процесса окомкования является образование на поверхности окатышей уплотненного слоя. В восстановительной среде доменной печи, активированной щелочами и другими компонентами, поверхность окатыша металлизируется с образованием слабопроницаемой для газов металлической корочки, затрудняющей проникновение восстановителей внутрь комка. Вследствие этого, процесс восстановления приобретает зональный характер по сечению комка. Чем плотнее исходная поверхность и чем меньше проницаемость образующегося металлизированного слоя, тем в большей степени внутренний объем окатыша будет представлен частично восстановленным материалом, в частности, до состояния монооксида железа.

В зависимости от состава и высокотемпературных свойств окатышей в них может образовываться большое количество вюститного материала, который при относительно невысокой температуре (~ 1150–1250 °С) превращается в жидкость, отделяющуюся при разрыве металлической оболочки. Увеличение количества кремнезема в составе окатышей увеличивает массу расплава (фаялита), который обладает весьма высокими агрессивными свойствами, обуславливающими разрушение кокса и неустойчивость плавки, что, в свою очередь, негативно влияет на характер формирования и стабильность свойств продуктов плавки. При сосредоточении таких окатышей у стен печи заметно снижается стабильность гарнисажа, а неравномерное их распределение по окружности печи может вызывать нарушения газодинамического режима.

Опыт проплавки в доменных печах рядовых частично офлюсованных окатышей свидетельствует, что отмеченные выше обстоятельства ухудшают технико-экономические показатели плавки, и, в ряде случаев, состояние печи.

Решение задачи повышения производительности доменных печей ПАО «Северсталь», при существующем технологическом ограничении содержания окатышей в железорудной части шихты доменной печи (ДП) № 5 и сохранении качества агломерата, обусловило необходимость отработки технологии производства окатышей с содержанием SiO_2 менее 3,2%.

Результаты сравнительной оценки металлургических свойств рядовых и низкокремнистых окатышей, приведенные в табл. 1, показали что, несмотря на некоторое ухудшение исходной и горячей прочности окатышей, в период отработки технологии производства нового вида сырья, их высокотемпературные свойства значительно улучшились. Например, температуры начала усадки, полной потери газопроницаемости слоя, начала фильтрации жидких фаз повысились в среднем на 60–80 °С. Масса первичного шлакового расплава уменьшилась на 25,0% (отн.), хотя содержание оксида железа в первичном шлаковом расплаве сохранилось на прежнем уровне.

Таблица 1. Состав и свойства рядовых и низкокремнистых окатышей.

Параметры		Окатыши	
		Рядовые	Низкокремнистые
Химический состав, %	Fe	63,35	66,0
	FeO	2,1	0,9
	SiO_2	5,04	3,06
	CaO	3,65	2,27
	MgO	0,22	0,2
	Al_2O_3	0,33	0,29
	CaO/SiO_2	0,72	0,74
Исходная прочность ИСО 4700			
Прочность, кг/ок		214	206
Низкотемпературная прочность ЖРС после восстановления (аналог ИСО 4696-2)			
LTD + 6,3, %		76,4	73,2
LTD (0–3,15), %		13,4	16,3
LTD (0–0,5), %		11,6	12,5
Восстановимость при 900 °С, % (Rf)		48,2	47,5
Высокотемпературные свойства			
Температура полной потери газопроницаемости слоя ($T_{45\%}$), °С		1200	1232
Температура начала фильтрации жидких фаз $T_{нф}$, °С		1350	1395
Содержание FeO в первичном шлаке ($FeO_{пш}$), %		36,17	35,7
Количество первичного шлака, ($M_{пш}$), %		29,4	23,8
Количество остатка расплава в слое кокса, ($M_{ост}$), %		7,2	7,9

Успешное решение Костомукшским горнообогатительным комбинатом задачи обеспечения стабильности качества низкокремнистых окатышей, позволило перейти на технологию доменной плавки с содержанием железа общего в шихте 60,5–61,5% и выходом конечного доменного шлака 210–230 кг/т чугуна.

В среднем содержание $Fe_{общ}$ в шихтовых материалах повысилось на 0,7%, что в соответствии с общепринятыми методиками расчета должно было привести к уменьшению удельного расхода кокса на 2,95 кг/т чугуна. Фактически общее снижение удельного расхода кокса в переходном периоде на ДП №5 составило 8,7 кг/т чугуна. Большее, по сравнению с ожидаемым, снижение расхода кокса при увеличении содержания $FeO_{общ}$ в шихте, вероятно, связано со следующими факторами, сопровождавшими замену рядовых окатышей низкокремнистыми:

- уменьшением поступления щелочных элементов с низкокремнистыми окатышами;
- уменьшением содержания серы в целом в шихте;
- повышением температурных уровней зон размягчения, полной потери газопроницаемости железорудного слоя и капельного течения первичных шлаковых расплавов низкокремнистых окатышей по сравнению с рядовыми на 35–40°С, что обусловило увеличение объема сухой зоны доменной печи, повышение восстановимости железорудного сырья, и, соответственно, способствовало снижению расхода кокса;
- уменьшением количества первичного шлака с высоким содержанием FeO. По результатам расчетов содержание FeO в среднем снизилось на 6–10% (отн.) по сравнению с традиционной шихтой, что соответствует сокращению расхода кокса на 1,2–1,5 кг/т чугуна.

Вместе с тем, уменьшение выхода шлака на 11,5–16,0% от общей массы шлакового расплава при переходе с рядовых окатышей на низкокремнистые уменьшило запас тепла в горне печи, что привело к снижению технологической устойчивости плавки.

Малошлаковая технология (как результат сокращения прихода пустой породы с шихтовыми материалами) в начале освоения сопровождалась тенденцией уменьшения длины леток (количество выпусков с длиной летки менее 3,0 м на ДП №5 в 2013 г. составило 7,3% от общего количества выпусков, в январе–феврале 2014 г. — 17,9%). Существенное уменьшение длин чугунных леток на ДП №5 потребовало принятия срочных мер, поэтому в марте 2014 г. были разработаны технологические приемы использования в шихте доменного щебня фракции 40–70 мм для обеспечения должного запаса тепла в горне и частичного сглаживания имеющихся колебаний качества кокса.

Работа доменных печей с низким выходом шлака при нестабильном и недостаточном качестве кокса обусловила необходимость поддерживать газодутьевые параметры ДП №5 на уровне, обеспечивающем температуры чугуна и шлака в пределах 1490–1520°С и 1520–1580°С, соответственно. В этих условиях поверхностное натяжение и вязкость конечного доменного шлака приблизились к уровню нижних граничных значений (0,215–0,279 Па·с), определенных требованиями к свойствам конечных доменных шлаков, инертных к футеровке доменной печи (рекомендованный диапазон вязкости 0,2–0,5 Па·с) [9]. При низком качестве кокса (CSR ≤ 50,0%, количество фракции — 0,5 мм в фурменном коксе более 2,5%) повышение гетерогенности шлакового расплава снижает его вязкость в геометрической прогрессии, увеличивая вероятность загромождения горна неплавкими массами.

Промышленная отработка малошлаковой технологии проводилась в переменных шихтовых условиях, при которых выход шлака, его основность и содержание оксида магния изменялись в пределах 220–270 кг/т чугуна, 0,92–1,08 ед. и 9,0–14,2%, соответственно.

На рис. 1–3 показаны результаты исследований влияния состава и выхода шлака на коэффициент распределения серы между чугуном и шлаком и степень насыщения чугуна углеродом для доменных печей с низким выходом шлака.

Анализ химического состава и свойств продуктов плавки показывает (табл. 2), что коэффициент распределения серы между чугуном и шлаком (Ls) при уменьшении выхода шлака с 300 кг/т чугуна до 220 кг/т чугуна снижается с 48 ед. до 24 ед., причем при работе доменных печей с выходом шлака менее 240 кг/т чугуна Ls не превышал 32 ед.

Таблица 2. Химический состав и свойства шлаковых расплавов.

Содержание компонентов, %	Значения				
	Среднегодовой уровень	Минимальное	Максимальное	Содержание MgO (опытная плавка), %	
				13,0	14,5
FeO	0,32	0,27	0,38	0,33	0,33
CaO	37,41	37,00	38,30	35,35	33,25
SiO_2	37,37	36,00	38,70	36,71	36,39
MgO	11,98	11,70	12,40	13,07	14,50
MnO	0,324	0,190	0,480	0,153	0,166
Al_2O_3	10,67	10,40	11,20	10,46	11,07
TiO_2	1,19	0,98	1,40	1,61	1,89
S	0,962	0,780	1,120	0,927	0,926
R_2O	0,873	0,770	0,960	1,061	1,082
Свойства					
Тнк, °С	1369,67	1369,72	1368,65	1371,86	1371,64
Ткк, °С	1315,60	1315,69	1313,86	1319,34	1318,96
h1500, Па•с	0,3366	0,2895	0,4102	0,3600	0,3720
s1500, мН/м	371,02	364,81	379,88	359,81	350,64
Энтальпия, кДж/кг	1848,10	1835,60	1858,47	1868,43	1889,75
Серопоглотительная способность, %	19,973	16,763	24,075	20,497	20,435
Выход шлака, кг/т чугуна	256	210	265	236	220

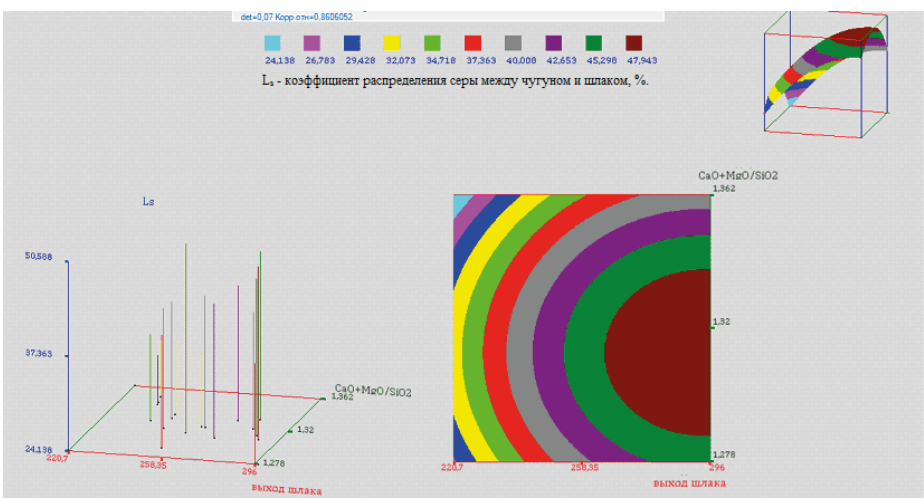


Рис. 1. Зависимости коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком от выхода шлака и его основности для условий ПАО «Северсталь»

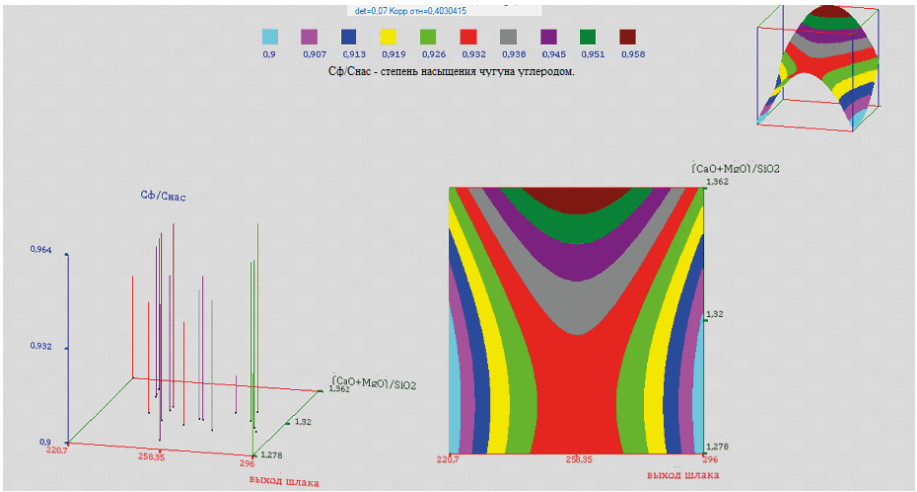


Рис. 2. Зависимости степени насыщения чугуна углеродом от выхода шлака и его основности для условий ПАО «Северсталь». $C_ф$ — фактическое содержание углерода в чугуне, %; $C_{нас}$ — содержание углерода в чугуне, соответствующее уровню насыщения, %

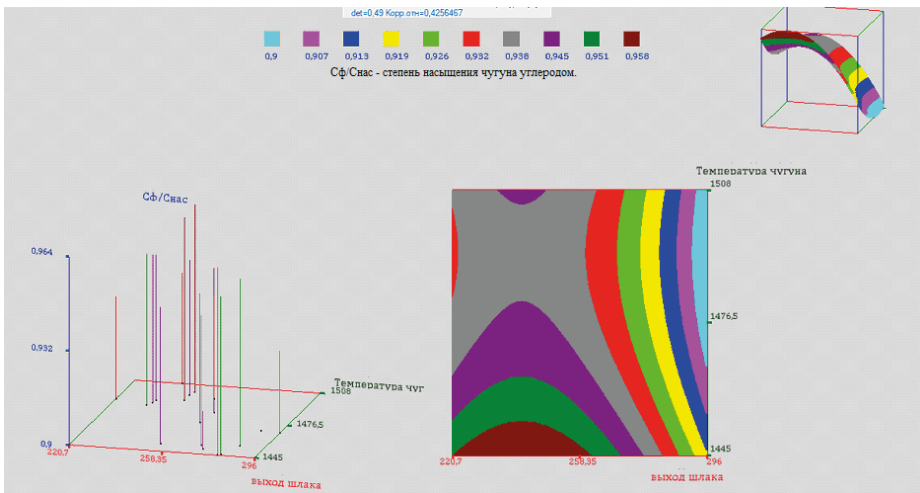


Рис. 3. Зависимости степени насыщения чугуна углеродом от выхода шлака и температуры чугуна для условий ПАО «Северсталь». $C_ф$ — фактическое содержание углерода в чугуне, %; $C_{нас}$ — содержание углерода в чугуне, соответствующее уровню насыщения, %

Таким образом, в условиях малошлаковой плавки (< 250 кг/т) при основности шлака $(CaO + MgO)/SiO_2$ = 1,28–1,32 ед. для доменных печей ПАО «Северсталь» уменьшение выхода шлака на каждые 10 кг/т чугуна сопровождалось увеличением содержания серы в чугуне на 0,003%.

Взаимосвязь степени насыщения чугуна углеродом с выходом шлака в данных исследованиях не выявлена. Изменением степени насыщения чугуна углеродом можно управлять корректировкой суммарной основности шлака и температурой чугуна.

Расчетно-аналитический прогноз показателей шлакового расплава при работе доменных печей с низким выходом шлака и увеличении содержания MgO с 11,5% (среднегодовой уровень) до 14,5% показал следующее:

- конечные шлаки с увеличением содержания MgO и при сохранении либо снижении основности $(CaO + MgO)/SiO_2$ становятся более «короткими»;

- поверхностное натяжение во всем температурном интервале уменьшается, его уровень ниже рационального примерно на 2–5%. Максимальное влияние на поверхностное натяжение оказывает основность CaO/SiO_2, влияние основности $(CaO + MgO)/SiO_2$, а также суммарное воздействие (FeO + MnO) на поверхностное натяжение гораздо слабее;
- температуры начала (Тнк) и конца кристаллизации (Ткк) при постоянном уровне основности $(CaO+MgO)/SiO_2$ повышаются на 2°С и 4°С, соответственно;
- энтальпия при постоянном уровне основности $(CaO+MgO)/SiO_2$ возрастает на 2,2%.

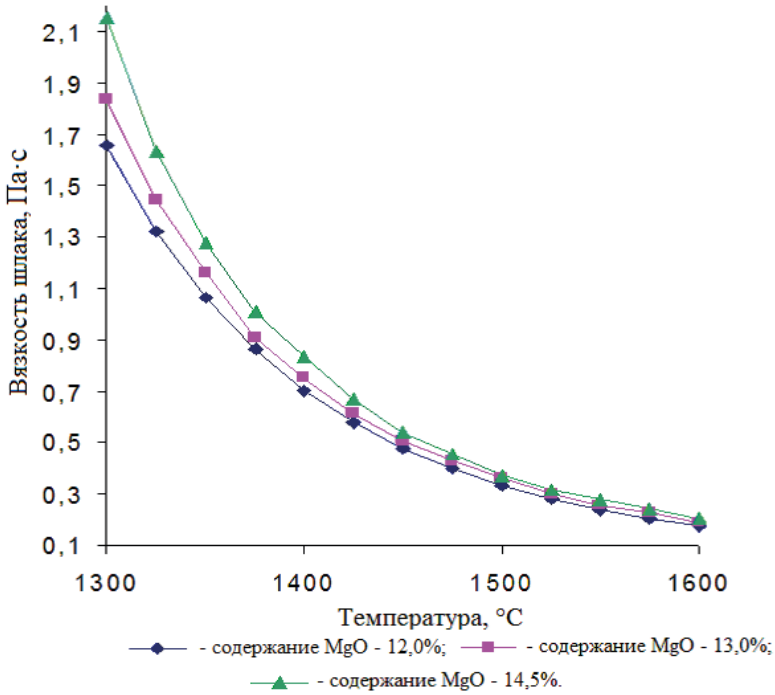


Рис. 4. Зависимость вязкости шлаков от температуры

Как видно, практически все свойства шлакового расплава, кроме поверхностного натяжения, соответствуют требованиям к конечным доменным шлакам. Вместе с тем, увеличение содержания MgO в конечном доменном шлаке до 14,5–15,0% приводит к повышению его вязкости в среднем на 10–15% без учета изменения его гетерогенности (рис. 4).

Использование в железорудной части доменной шихты 30–35% низкокремнистых окатышей позволило в среднем сократить основность агломерата на 0,15 ед., что улучшило подготовку флюса к агломерационному процессу и стабилизировало основность спекаемого агломерата, а также позволило сократить простои оборудования на внеплановые остановки. Кроме этого, необходимо отметить, что значения высокотемпературных свойств агломерата и окатышей сблизились, повысив устойчивость технологического процесса плавки.

Период освоения технологии работы доменных печей с низким выходом шлака прерывался вынужденным переходом на кокс с низкими показателями горячей прочности и повышенной колеблемостью его реакционной способности, что в условиях малошлаковой плавки привело к появлению признаков загромождения горна ДП № 5. Результаты зондирования горна ДП №5 показали, что при работе на коксе низкого качества зона с пониженной проницаемостью («тотерман») увеличилась с 6–8% до 14% объема горна на уровне фурм. Систематических промывок горна от флюсовой составляющей и коксового мусора оказалось недостаточно, поэтому выход конечного доменного шлака увеличили до 250 кг/т чугуна путем ввода шлакового щебня.

Последующее повышение качества кокса по показателям М10 и CSR до уровня 7,4% и 55,0%, соответственно позволило продолжить освоение технологии доменной плавки с выходом шлака 210–230 кг/т чугуна и обеспечить выплавку передельного чугуна на ДП №5 в количестве 13 200–13 800 т/сутки.

Освоение работы доменных печей с низким выходом конечного доменного шлака, а также внедрение комплекса новых технологических приемов и мероприятий в коксоаглодоменном производстве ПАО «Северсталь» позволило в 2015 г. на четырех доменных печах выплавить более 9,2 млн. т передельного чугуна и снизить содержание [Si] в чугуне на 0,03%.

Список литературы

1. Жак Р.М., Юсфин Ю.С., Черноусов П.И.и др. // Ин-т «Черметинформация», — М. — 1982 (Обзорн. информ. Сер. Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна. — Вып. 1. — С. 36).
2. Орлова П.П., Осетров М.С., Андронов В.Н. и др. //Повышение качества шихтовых материалов для доменной плавки на предприятиях УССР и за рубежом. — К. — ЦБТИ МЧМ УССР. — 1969. — 66 с.
3. Алексеев Л.Ф., Горбачев В.А., Кудинов Д.З. и др. // Структура и разрушение окатышей при восстановлении. — М. — Наука. — 1983. — 78 с.
4. Юсфин Ю.С., Базилевич Т.Н. Обжиг железорудных окатышей. — М. — Металлургия. — 1973. — 272 с.
5. Гладков Н.А., Нестеров А.С. // Известия АН СССР. — Металлы. — 1987. №3. — С. 3–11.
6. Гладков Н.А., Тогобицкая Д.Н., Нестеров А.С. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. — Сб. тр. ИЧМ. — 1998. — Вып. №2. — С. 83–87.
7. Большаков В.И., Гладков Н.А., Шутылев Ф.М. и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. — Сб. тр. ИЧМ. — 2002. — Вып. №2. — С. 27–38.
8. Никифоров В.Н. Особенности работы доменных печей на окатышах в связи со спецификой их металлургических свойств: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. — Днепропетровск. — ИЧМ. — 1983. — С. 20.
9. Металлургия чугуна // Учебник для вузов. 3–е изд. перераб. и доп. / Под редакцией Ю. С. Юсфина. — М. — ИКЦ «Академкнига». — 2004. — 774 с.

М.Н. Суворов, «Paul Wurth»

СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ДЛЯ РАБОТЫ С ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ КАМПАНИИ

Компания Пауль Вюрт имеет достаточно давнюю историю деловых связей с СССР и Россией. В 2016 году исполнилось 40 лет с тех пор, как компания Пауль Вюрт осуществила первую поставку в СССР бесконусного загрузочного устройство (БЗУ) для доменной печи № 6 НЛМК. Сегодня из 24 предприятий в странах СНГ, имеющих в своём составе доменные печи, 13 используют оборудование и технологии компании Пауль Вюрт. Полное портфолио компании кроме собственно доменного производства сегодня охватывает производство кокса, агломерата, окатышей и технологии прямого восстановления железа, то есть все начальные стадии производства стального проката на металлургическом комбинате.

Полное портфолио Paul Wurth для первых стадий производства металлопроката

Продолжительность кампании доменной печи в большой степени определяется её удельной производительностью, при этом существует множество конструкционных и технологических способов обеспечения условий для работы доменной печи с высокой производительностью при длительной кампании. Крайне важно к концу кампании печи иметь достоверную информацию об остаточном ресурсе её работы и иметь возможность продлевать его с помощью промежуточных ремонтов. Далее приведен перечень и краткое описание технологий и оборудования компании Пауль Вюрт, помогающих технологам в решении этих важных задач.

Продление кампании Доменных Печей

CTG-G3 (Главный редуктор БЗУ третьего поколения)

Распределение шихты в доменной печи с помощью лоткового БЗУ, став современным стандартом доменного производства, создаёт условия для организации оптимального газораспределения, как с точки зрения топливной экономичности, так и с точки зрения снижения износа футеровки и системы охлаждения доменной печи. Последняя разработка в этом направлении главный редуктор БЗУ третьего поколения. Он отличается применением системы охлаждения в замкнутом контуре химочищенной

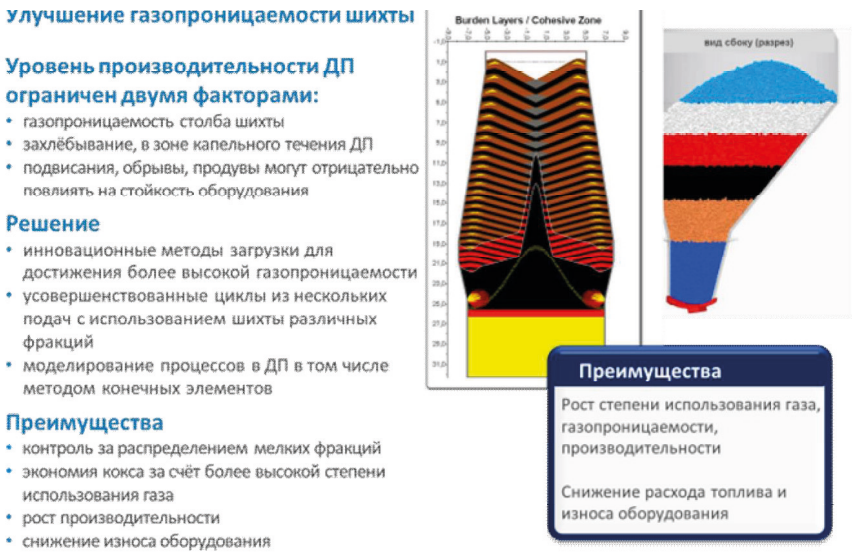
Распределение шихты в ДП с помощью БЗУ

водой и повышенной в 1,5 раза до 12 об/мин скоростью вращения лотка. Для технологов такие изменения означают повышение надёжности работы БЗУ при высоких температурах колошникового газа (продувы шихты, упущения уровня засыпи) и возможность более точного распределения шихты по радиусу. Последнее особенно важно в условиях непрерывно снижающегося качества шихтовых материалов и повышения доли мелкофракционных добавок в шихту — коксового орешка и мелкого агломерата.

Распределение шихты в ДП — концепции и модели

Следует отметить, что без достоверного прогнозирования распределения шихтовых материалов в столбе шихты доменной печи, повышение доли мелкофракционных добавок в шихте вместо снижения себестоимости чугуна приведёт к её росту. Поэтому Пауль Вюрт предлагает доменщикам модели, контролирующие прохождение всех составляющих порций шихтовых материалов от шихтоподачи до зоны когезии в печи.

Распределение шихты в ДП — концепции и модели



3-х мерный сканер/профилемер 3-D TopScan

Реальное же расположение шихты на колошнике контролирует 3-х-мерный сканер/профилемер 3-D TopScan. Это оборудование, использующее последние достижения радиолокационной техники, в течение 20 секунд промеряет положение нескольких тысяч точек на поверхности шихты, выдавая её точную топографию. При этом новый профилемер располагается вне рабочего пространства колошника, не имеет движущихся частей (кроме отсечного клапана) и не мешает загрузке ДП. Как и традиционный профилемер, он снабжает технологов информацией о распределении рудной нагрузки и скорости опускания шихты, но уже не по одному лишь радиусу, а по всему сечению колошника.

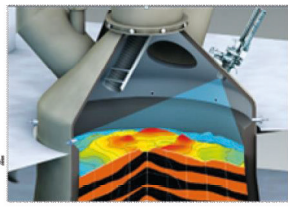
Медные плитовые холодильники с длительным сроком службы

В последние годы многие печи, оснащённые медными плитовыми холодильниками, испытывают трудности с обеспечением их стойкости. Происходит это в тех случаях, когда медный холодильник, не защищённый слоем защитного гарнисажа, подвергается абразивному воздействию кусками опускающейся шихты. Для противодействия таким неблагоприятным условиям, как правило, вызванным

3-х мерный сканер/профилемер 3-D TopScan

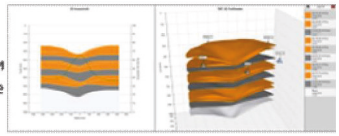
3-х-мерный сканер/профилемер 3-D TopScan

Выдаёт профиль всей поверхности шихты, а не только по некоторым точкам



Вызовы

- Обеспечить непрерывное измерение, в том числе при загрузке шихты
- Исключить попадание загружаемой шихты на зонд
- Обеспечить контроль всей поверхности шихты



Решение

- 3D TopScan™ использует последние достижения в области технологий радаров и антенн и обеспечивает сканирование поверхности по тысяче точек за несколько секунд

Преимущества

- Непрерывное измерение после и во время загрузки
- Высочайшее разрешение
- Не сдерживает производительность загрузки
- Одно полное измерение всей поверхности колошника каждые 20 секунд
- Компактный и простой дизайн
- Не входит под купол ДП, не создаёт помех
- Техобслуживание возможно на работающей печи
- Не требуются площадки обслуживания

Преимущества

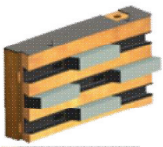
Лучшее понимание процесса, ведущее к экономии кокса.

Раннее обнаружение отклонений от нормальной работы, исключающее расстройства и износ

Элементы охлаждения ДП

Медные плитовые холодильники с длительным сроком службы

Медные плитовые холодильники с металлическими вставками



Вызовы

- Новые режимы работы ДП возникли из-за стремления к высочайшим уровням производительности, несмотря на использование шихты более низкого качества
- Из-за понижения уровня плавления материалов в ДП, происходит ускоренный абразивный износ медных плитовых холодильников (в распаре и верхней части заплечиков) обусловленный контактом с неподготовленной шихтой

Решение

- Металлические вставки в канавки медных холодильников, ведущие к:
  - Повышение турбулентности движения газа у стен ДП
  - Значительный рост сопротивления механическому истиранию
- Изогнутые плитовые холодильники для полного соответствия профилю ДП

Преимущества

- Значительный рост срока службы медных пл. холодильников
- Снижение толщины холодильников ведёт к снижению капзатрат и/или росту производительности (рост объёма ДП)

Преимущества

Рост производительности

Увеличение полезного объёма ДП

Рост срока службы плитовых холодильников

Продление кампании ДП

стремлением к обеспечению максимальной газопроницаемости столба шихты, были разработаны и проверены ряд конструктивных доработок элементов охлаждения. Стальные пластины, огнеупорные и чугунные вставки, а также выполнение тела холодильника изогнутым параллельно кожуху, позволяют в значительной мере повысить абразивную стойкость медных плитовых холодильников без ущерба их безусловной термической стойкости.

Многоточечная термопара и зонд определения теплового потока (МТЗ)

Часто к концу кампании доменной печи важно знать фактическую остаточную толщину футеровки в горне. Однако, как правило, достаточное для этого количество термопар отсутствует, а показания теплосъёмов системы охлаждения могут быть обманчивыми из-за образования кольцевой зоны охрупчивания футеровки препятствующей свободному прохождению теплового потока из рабочего пространства горна. Для этих случаев Пауль Вюрт разработал многоточечную термопару/зонд определения теплового потока. Устанавливается она на короткой остановке доменной печи после кернового бурения (которое само по себе предоставляет важные данные по состоянию огнеупоров) в критическом районе. За счёт применения специальной системы охлаждения и непрерывного контроля температуры в ходе бурения устраняется опасность аварийного выхода чугуна в ходе этой операции без предварительного выпуска козла. После установки зонда технолог получает достоверные данные о распределении температур (как следствие о тепловых потоках, а значит и о толщине футеровки) в критических зонах горна, что позволяет точно прогнозировать остаточный ресурс работы печи и обоснованно принимать технологические меры по его продлению.

Многоточечная термопара и зонд определения теплового потока (МТЗ)

Горячий ремонт воздухонагревателей

В ряде случаев возникает необходимость провести ремонт футеровки нижней части камеры горения воздухонагревателей (например, торкретирование для устранения «короткого замыкания» или ремонт штуцера горелки). Как правило, сам ремонт занимает не более 2-х недель, однако воздухонагреватель следует охлаждать по определённому графику 3 недели и затем столько же в определённом режиме разогревать. Таким образом, при каждом таком ремонте 8 недель печь работает с температурой горячего дутья на 200 °С ниже нормальной. Пауль Вюрт разработал способ ремонта футеровки нижней части камеры горения воздухонагревателей без охлаждения всего аппарата. Это достигается за счёт использования специального метода теплоизоляции и поддержания нормальной температуры неремонтируемой футеровки горелками. При этом только две недели печь работает с температурой горячего дутья на 200 °С ниже нормальной. Каждый такой ремонт даёт экономию кокса для печи среднего

3-х мерный сканер/профилемер 3-D TopScan

размера около 5000 тонн, кроме того повышается производительность доменной печи и срок службы воздухонагревателя за счёт исключения одного цикла нагрева/охлаждения.

Энергосберегающий фурменный прибор

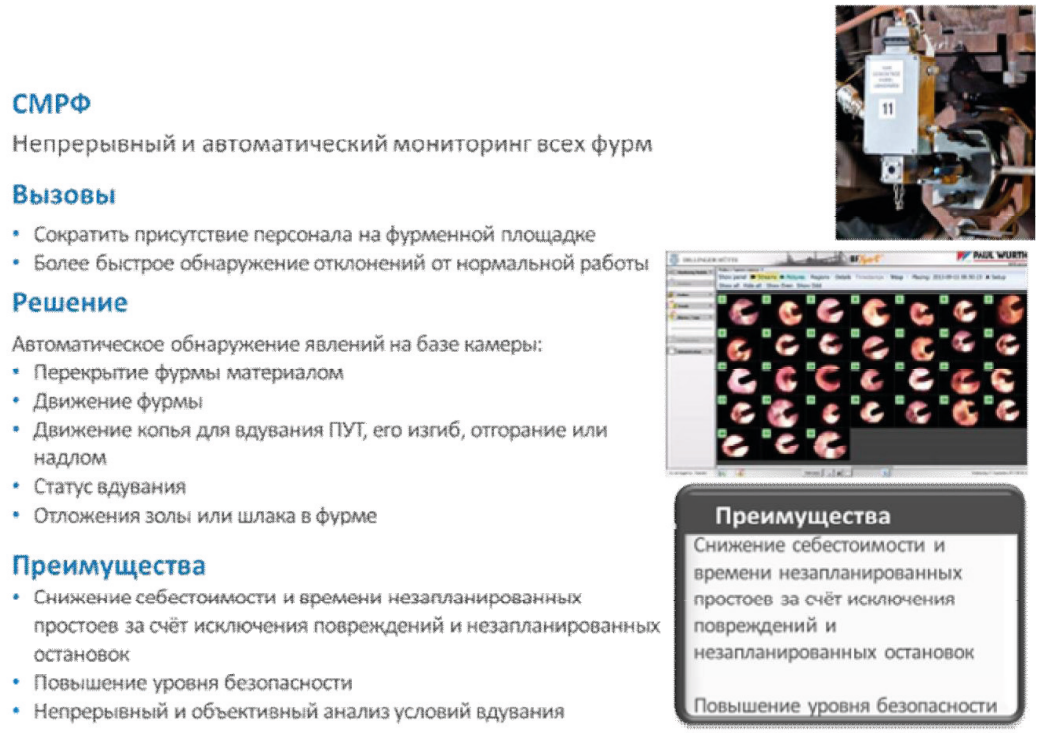
Сам по себе фурменный прибор сильфонного типа, не имеющий водяного охлаждения, уже снижает потери тепла горячего дутья от воздухонагревателя до горна на 40 МДж или на 2 кг/т чугуна. Недавно разработанные энергосберегающие фурменные приборы за счёт применения высокоэффективной теплоизоляции дополнительно к тому сокращают потери тепла на величину до 20 МДж или на 1 кг/т чугуна за счёт снижения потерь тепла через кожух прибора в атмосферу. При этом температура кожуха прибора снижается в 2 раза до 120 °С. Кроме повышения уровня безопасности и улучшения условий труда на фурменной площадке, таким образом, снижается расход суммарного топлива, и повышается возможный расход дополнительно вдуваемого топлива.

Энергосберегающие фурменные приборы

Мониторинг работы фурм (СМРФ)

Система мониторинга работы фурм заключается в подключении к гляделке каждого фурменного прибора через полупрозрачное зеркало видеокамеры, передающей изображение работы фурменной зоны в пульт управления доменной печи. Помимо того, что устраняется необходимость присутствия персонала на фурменной площадке (что повышает уровень безопасности труда), за счёт работы системы анализа видеосигнала обеспечивается непрерывный автоматический контроль работы фурм. Перекрытие фурмы гарнисажем, появление шлака, затягивание фурмы в печь, отгорание или деформация копья для вдувания пылеугольного топлива — все эти явления немедленно выявляются, и оператору поступает соответствующий сигнал. В ряде случаев такой сигнал может предотвратить технологические инциденты, последствия которых обходятся в разы дороже затрат на установку такой системы.

Система мониторинга работы фурм (СМРФ)



Мониторинг состояния оборудования доменной печи

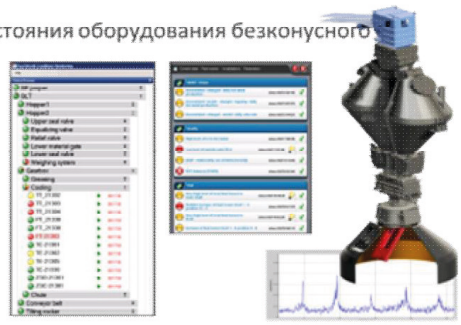
В продолжение предыдущей темы, оснащение оборудования доменной печи соответствующими датчиками, непрерывно передающими информацию (вибрация, температура, расход, шум, давление и т.д.) для анализа, обеспечивает непрерывный автоматический мониторинг состояния оборудования.

Это дает оператору возможность обоснованного и своевременного планирования планово-предупредительных ремонтов, исключения незапланированных простоев и оптимизации расходов на техобслуживание. До настоящего момента такие системы применяются для БЗУ, но нет никаких препятствий для распространения этой практики и на другое оборудование комплекса доменной печи.

Мониторинг состояния комплекса и оборудования

Мониторинг состояния БЗУ

Непрерывный автоматический контроль состояния оборудования безконусного загрузочного устройства



Вызовы

- Увеличить производительность ДП за счёт:
  - Подготовленной остановки ДП
  - Раннего обнаружения отклонений от нормальной работы (вибрации, температуры, негерметичности, шум,...)

Решение

- Надёжные КИП
- Обработка и анализ сигналов
- Система визуализации и сигнализации в режиме реального времени
- Регистрация событий и автоматическое составление отчётов

Преимущества

- Точный прогноз срока службы критических частей
- Возможность дистанционный поддержки специалистами Paul Wurth
- Полностью открытый интерфейс пользователя

Преимущества

Исключает незапланированные остановки ДП и внезапные повреждения оборудования БЗУ

Позволяет заранее проводить корректирующие действия

Экспертная система управления доменным процессом BFXpert

Оперативная адаптация параметров процесса и раннее обнаружение всех явлений, приводящих к нарушению ровного хода доменной печи или незапланированным простоям, немедленно снижает себестоимость продукции, аварийность, а также повышает производственную и экологическую безопасность производства. Всё возрастающее количество параметров работы доменной печи, которые необходимы для контроля качества продукции и снижения её себестоимости, всё более и более затрудняет оценку и анализ этих данных персоналом, управляющим доменной печью. Операторы буквально тонут в огромном потоке информации от контрольно-измерительных приборов, из лаборатории и т.д.

Оптимизация доменного процесса и экспертная система

BFXpert® – модульный и конфигурируемый инструмент технологической оптимизации для доменной печи

Вызовы

- Оптимизировать качество чугуна и эффективность доменного процесса
- Минимизировать затраты (расход кокса)
- Предложить дистанционную технологическую поддержку и услуги по выявлению и решению проблем

Решение

- Современный, модульный и удобный программный инструмент, интегрирующий большой опыт Paul Wurth в производстве чугуна и свободно конфигурируемый пользователем

Преимущества

- Минимальный расход кокса за счёт ровного хода ДП (низкое содержание кремния)
- Широкий диапазон возможностей, включая опыт ArcelorMittal (Sachem®), мониторинг состояния оборудования, сбор данных
- Раннее обнаружение отклонений процесса, технологические рекомендации в режиме онлайн
- Дистанционный технологический аудит

Преимущества

Снижение расхода топлива, ровный ход ДП, исключение инцидентов

Минимизация простоев

Для решения комплекса этих проблем Пауль Вюрт разработал экспертную систему управления доменным процессом с расширенными возможностями BFXpert, интегрирующую основанную на базе знаний экспертов доменщиков (250 человеко-лет работы экспертов Европейской группы Usinor, впоследствии вошедшей в группу Arcelor Mittal) экспертную систему, а также имитационные модели и программные инструменты на общей платформе. BFXpert обеспечивает непрерывную поддержку в ведении доменной печи, разделяя работу операторов и сотрудничая с ними, что позволяет достичь максимально возможных технико-экономических показателей в любых условиях.

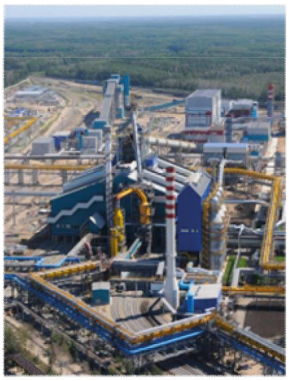
Ключевые проекты в странах СНГ

Реализованные: Новая ДП7 (НЛМК, Россия), Модернизация ДП2, (АМ Темиртау, Казахстан), Модернизация ДП3, (АМ Темиртау, Казахстан), ПУТ для ДП4 и ДП5 (НЛМК, Россия), ПУТ (НТМК, Россия), ПУТ (ЗСМК, Россия), ПУТ (ЗСМК, Россия), ПУТ (ДМКД, Украина), Модернизация ДП4 (АМ Темиртау, Казахстан).

Текущие: Полная реконструкция ДП6 (НЛМК, Россия), ПУТ для ДП6 и ДП7 (НЛМК, Россия), Новая ДП7 (НТМК, Россия).

Имея большое количество успешно реализованных, а также текущих крупных проектов на территории СНГ, компания Пауль Вюрт приобрела значительный опыт работы в условиях местных законодательных и технических норм, а также опыт взаимодействия с локальными проектными и строительно-монтажными организациями.

Ключевые проекты в странах СНГ



Новая ДП7, НЛМК, Россия

Реализованные

- Новая ДП7, НЛМК, Россия
- Модернизация ДП2, АМ Темиртау, Казахстан
- Модернизация ДП3, АМ Темиртау, Казахстан
- ПУТ для ДП4 и ДП5 НЛМК, Россия
- ПУТ для НТМК, Россия
- ПУТ для ЗСМК, Россия
- ПУТ для ДМКД, Украина
- Модернизация ДП4, АМ Темиртау, Казахстан

Текущие

- Полная реконструкция ДП6, НЛМК, Россия
- ПУТ для ДП6 и ДП7 НЛМК, Россия
- Новая ДП7, НТМК, Россия

М.В. Чукин, С.К. Сибагатуллин, А.С. Харченко,
Л.Д. Девятченко, МГТУ им. Г.И. Носова
А.А. Полинов, М.А. Семенюк, В.А Бегинюк, ОАО «ММК»

ВЫЯВЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЗАГРУЗКИ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ, ОСНАЩЕННУЮ КОМПАКТНЫМ БЗУ ЛОТКОВОГО ТИПА

Физическим моделированием работы компактного бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) лоткового типа и проведением промышленных экспериментов на доменных печах ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» установили рациональные режимы загрузки железорудных материалов в колошниковое пространство для различных шихтовых условий. Наиболее высокие технико-экономические показатели плавки обеспечивала загрузка материалов в бункер БЗУ в следующей последовательности: на дно бункера 25% агломерата, затем окатышей, далее загрузка оставшегося 75% агломерата. Промышленное опробование данного режима загрузки сопровождалось уменьшением удельного расхода кокса на 0,7% и повышением производительности печи на 2%.

Загрузка коксового орешка в средний слой шихты в бункере БЗУ обеспечивала показатель равномерности его поступления из бункера, равный 0,85 против 0,13 при загрузке его в бункер последним. Повышение равномерности распределения коксового орешка в опытных плавках на доменной печи обеспечило улучшение фильтрующей способности коксовой насадки в горне печи. Количество остающегося в печи шлака сократилось с 14,1 до 9,9 тонн, интервал времени от начала выпуска продуктов плавки до появления шлака уменьшился с 18,4 до 15,1 мин, его вязкость снизилась с 0,64 до 0,25 Па·с. Коэффициент замены им кокса увеличился с 0,59 до 0,85 кг/кг. Степень прямого восстановления Fe из FeO снизилась с 39,9 до 38,7%, степени восстановления монооксидом углерода и водородом повысились с 33,4 до 30,0% и с 26,7 до 31,3% соответственно.

В условиях работы доменных печей с повышенной долей окатышей, превышающей 38%, целесообразно использование режима «добавки на дно скипа», который обеспечивает отдаление части окатышей от футеровки. Опытные периоды работы двух печей длительностью два месяца показали, что такой режим способствует сохранению стойкости системы охлаждения шахты, распара и заплечиков с понижением средних температур тела холодильников на 6,3°С, благодаря формированию гарнисажа.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Наиболее высокие технико-экономические показатели доменной плавки достигаются при обеспечении равномерного распределения компонентов шихты по окружности колошника [1-3], состава газовой фазы и его количества в фурменных очагах [4], оптимального распределения материалов и газа по радиусу печи [5-9]. Ввиду многокомпонентности шихты, используемой в настоящее время на доменных печах ОАО «ММК», которая включает агломерат, окатыши и различные добавочные материалы — коксовый орешек или фракция, флюс в виде известняка или кварцита, промывочные материалы, например марганцевая или железная руда, возникают проблемы с обеспечением равномерного их распределения по окружности колошника [1,4,10–11]. Это отрицательно сказывается на ходе процессов. Расположение железорудной части шихты вблизи коксового орешка изменяет скорость и степень восстановления агломерата и окатышей [12–14]. Неравномерное содержание окатышей и агломерата по окружности печей приводит, в частности, к различию начала и конца размягчения железорудного сырья по секторам, что ведёт к нарушениям в движении потоков шихты и газа [15, 16]. Неравномерное распределение промывочных материалов отрицательно сказывается на равномерности химического состава чугуна и шлака по окружности горна.

Равномерность поступления материалов из шихтового бункера на поверхность шихты зависит от конструктивных особенностей и наклона лотка, скорости его вращения, уровня засыпи, характеристик материала, степени открытия шихтового затвора, расхода компонентов шихты [17, 18]. Величина уровня засыпи определяется исходя из условий работы печи. Например, ее изменение может являться результатом ухудшения или улучшения газодинамики в верхней ее части, поэтому увеличивать или уменьшать ее с целью повышения равномерности распределения материалов в колошниковом пространстве печи чаще всего не целесообразно. Скорость вращения лотка и угол открытия шихтового затвора обеспечивают совпадение мест поступления начала и конца выгрузки материалов. Одним из определяющих факторов является последовательность набора материалов в шихтовый бункер [10, 19]. Рациональное размещение компонентов в слое шихты в большей степени зависит от расхода материалов. В связи с этим, актуальным является выявление рациональных режимов загрузки доменных печей в зависимости от шихтовых условий.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЗАГРУЗКИ

Рациональные режимы загрузки шихтовых материалов выявляли путем физического, математического моделирования и проведением промышленных экспериментов на доменной печи ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Для выявления математической зависимости между основными параметрами загрузки и показателями равномерности поступления компонентов шихты в колошниковое пространство печи исследовали многомерный массив данных объемом n=114, включающий параметры загрузки и показатели равномерности. Эксперименты проводили на физической модели бесконусного загрузочного устройства лоткового типа [10] (рис. 1).

Рассмотрены следующие факторы (табл. 1): последовательность загрузки компонентов шихты в бункер бесконусного загрузочного устройства, в том числе отдаленность от выпускного отверстия окатышей (М1), коксового орешка и промывочных материалов (М2); доля окатышей от расхода железорудной части шихты (М3); расход добавочных материалов (М4).

Рис. 1. Физическая модель однотрактового компактного загрузочного устройства лоткового типа

В качестве параметра оптимизации использовали показатели равномерности поступления компонентов шихты из шихтового бункера [1, 10] — агломерата (T_1), окатышей (T_2), коксового орешка (T_3) и промывочных материалов (T_4). Оценивали ее вариацией соответствующей переменной по ходу выпуска материала из бункера БЗУ на лоток [10].

Обработку данных выполнили регрессионным анализом с применением множественной регрессии [20]. В основу положена корреляционная матрица признаков, представленных в табл. 1.

Исходя из корреляционной матрицы (табл. 1) показатель равномерности распределения агломерата в большей степени зависит от расхода окатышей и добавочных материалов. Наиболее полно влияние исследуемых регрессоров на результативный признак описывает линейная по параметрам нелинейная модель, полученная методом Гаусса-Ньютона (табл. 2, модель № 1). Анализ результатов моделирования показывает, что при увеличении расхода окатышей и добавочных материалов равномерность поступления агломерата из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи ухудшается (рис. 2).

Таблица 1. Корреляционная матрица.

Переменные	M_1	M_2	M_3	M_4	T_1	T_2	T_3	T_4
M_1	1,00	0,41	–0,01	–0,01	0,05	0,43	0,07	–0,19
M_2	0,41	1,00	0,03	–0,01	–0,08	0,14	0,49	0,18
M_3	–0,01	0,03	1,00	0,21	–0,77	0,58	–0,12	–0,08
M_4	–0,01	–0,01	0,21	1,00	–0,23	0,06	0,05	0,05
T_1	0,05	–0,08	–0,77	–0,23	1,00	–0,20	–0,02	–0,00
T_2	0,43	0,14	0,58	0,06	–0,20	1,00	–0,05	–0,01
T_3	0,07	0,49	–0,12	0,05	–0,02	–0,05	1,00	0,56
T_4	–0,19	0,18	–0,08	0,05	–0,01	–0,01	0,56	1,00

Таблица 2. Оценки линейных по параметрам нелинейных моделей.

Номер модели	Вид нелинейных уравнений	Степень детерминации
1	$T_1 = 0{,}82 - 0{,}00011M_3^2 - 0{,}00092M_4^2$	0,60
2	$T_2 = -1{,}18 + 0{,}08M_1 + 0{,}04M_3 - 0{,}001M_1^2 - 0{,}0002M_3^2 - 0{,}001M_1M_3 + 5{,}14\cdot10^{-8}\cdot M_1^2\cdot M_3^2 + 4{,}28\cdot10^{-6}\cdot M_1^3 + 7{,}54\cdot10^{-5}\cdot M_1\cdot M_3^2 + 9{,}93\cdot10^{-6}\cdot M_1^2\cdot M_3$	0,90
3	$T_3 = -0{,}68 + 0{,}041M_{12} - 0{,}00036M_{12}^2$	0,62

Изменение величины показателя равномерности окатышей на 90% объясняет уравнение, включающее такие факториальные признаки, как содержание окатышей в железорудной части шихты и расположение их в бункере БЗУ (табл. 2, модель №2). При этом наиболее высокую равномерность поступления окатышей из бункера БЗУ на лоток наблюдали при размещении их в слое агломерата (рис. 3).

Отклики T_3 и T_4 имеют тесную положительную связь между собой

$$\hat{\rho}(T_3, T_4) = 0{,}557\,,$$

что является результатом совместного расположения коксового орешка и промывочных материалов в слое агломерата. Из блока М наибольшее влияние на показатель равномерности добавочных материалов оказывают факторы, связанные с их размещением в слое шихтовых материалов (M_1, M_2). В связи с этим для оценки зависимости выходных параметров T_3 и T_4 от факториальных признаков, входные переменные M_1 и M_2 объединили в один суммарный регрессор — M_{12}, который характеризует содержание шихтовых материалов, в том числе агломерата, окатышей и добавочных материалов, располагающихся под коксовым орешком или промывочными материалами. Результаты показывают, что при расположении орешка и промывочных материалов в нижней части бункера БЗУ показатель равномерности их поступления из бункера в колошниковое пространство печи минимальный. Наиболее высокую его величину обеспечивает размещение добавок в слое железорудного сырья (рис. 4).

Из анализа рис. 3 и 4 следует, что на равномерность поступления железорудных материалов значительное влияние оказывают следующие факториальные признаки — последовательность загрузки компонентов шихты и содержание окатышей. Зависимость между ними можно описать регрессионным уравнением 1 (R^2=0,87) и в виде графика (рис. 5).

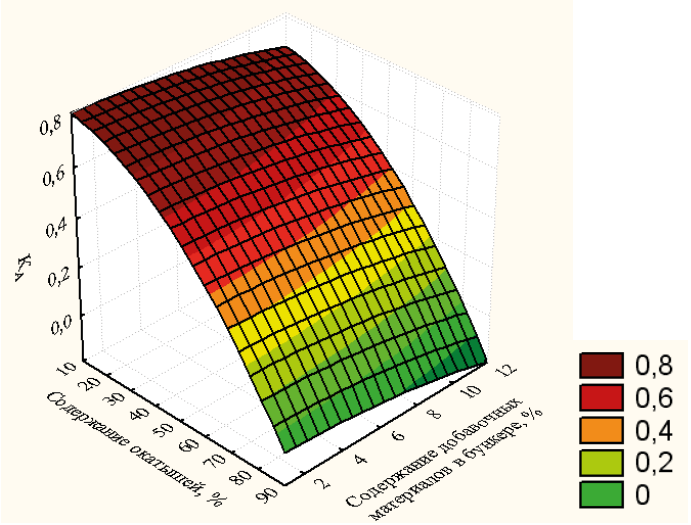


Рис. 2. Зависимость показателя равномерности поступления агломерата в колошниковое пространство печи от доли окатышей в железорудной части шихты и расхода добавочных материалов

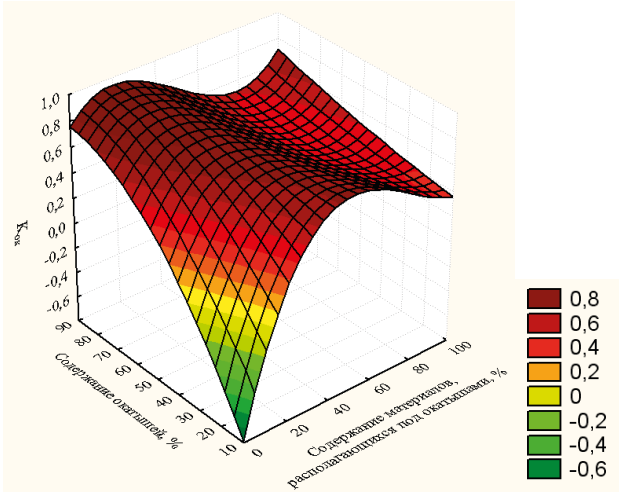


Рис. 3. Зависимость показателя равномерности поступления окатышей в колошниковое пространство печи от их доли в железорудной части шихты и расположения в слое агломерата

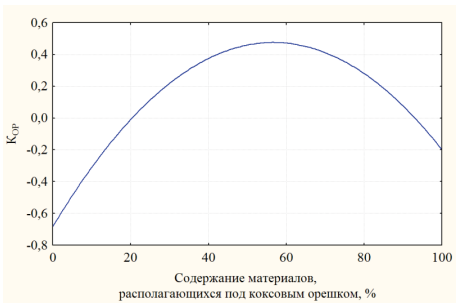


Рис. 4. Зависимость показателя равномерности поступления коксового орешка в колошниковое пространство печи от расположения его в слое шихтовых материалов

$$T_{12} = 0{,}05 + 0{,}04M_1 - 0{,}0007M_1^2 + 0{,}0002M_3^2 - 3{,}45\cdot10^{-6}M_1M_3^2 + 1{,}96\cdot10^{-8}M_1^2M_3^2 + \\ + 3{,}44\cdot10^{-6}M_2^3 - 1.11\cdot10^{-6}M_2^3 \qquad (1)$$

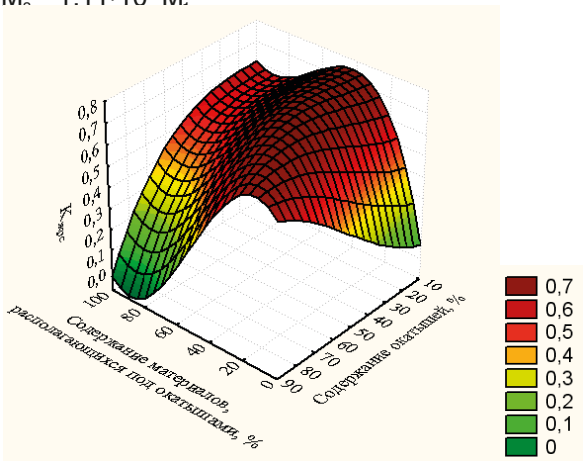


Рис. 5. Зависимость показателя равномерности поступления железорудных материалов в колошниковое пространство печи от доли окатышей и расположения их в слое агломерата

Из рис. 5 следует, что наиболее высокую равномерность обеспечивала загрузка материалов в следующей последовательности: на дно шихтового бункера 25% агломерата, затем окатышей, далее загрузка оставшегося 75% агломерата. При доле окатышей от 10 до 30% размещение их в нижней части бункера БЗУ сопровождается неравномерным их поступлением в колошниковое пространство печи.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На доменной печи ОАО «ММК» исследовали действие разработанных режимов загрузки компонентов шихты на показатели ее работы. В периоде I коксовый орешек размещали в нижней части бункера БЗУ, в периоде II его загружали последним, в третьем — в середину. В периодах IV–VIII режимы загрузки шихтовых материалов отличались долей агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ — 0; 17 и 100%. Результаты исследований приведены в табл. 3–7.

Таблица 3. Показатели дренажной способности горна .

Наименование показателей	Место размещения коксового орешка в бункере БЗУ		
	низ	верх	середина
Период	I	II	III
Показатель равномерности поступления коксового орешка в колошниковое пространство	-1	0,13	0,85
Количество остающегося в печи шлака, тонны	12,2	14,1	9,9
Время от начала выпуска продуктов плавки до появления шлака, мин	15,4	18,4	15,1
Расчетная вязкость шлака, Па·с	0,32	0,64	0,25

В первом периоде при размещении коксового орешка в нижней части бункера БЗУ количество остающегося в печи шлака (ΔV) составило 12,2 т (табл. 3). При загрузке коксового орешка в бункер БЗУ последним (период II) — оно увеличилось до 0,44, что свидетельствует об ухудшении дренажной способности горна. В третьем периоде в условиях расположения коксового орешка в середине объема шихтовых материалов ΔV уменьшилось до 9,9 т, свидетельствуя о наилучшей дренажной способности кокса в горне печи.

Таблица 4. Основные технологические показатели работы доменной печи в периодах I-III.

Наименование показателей	Период		
	I	II	III
Длительность периода, сутки	6	6	7
Расход коксового орешка (сухого), кг/т чугуна	19,6	19,8	19,8
Удельный расход кокса (сухого, скипового),			
Производительность, рассчитанная по фактическому количеству загруженных подач, т/сутки	3460	3447	3483
Расход сырьевых материалов, кг/т чугуна:	1692	1691	1697
Интенсивность хода, т/($м^3$ сутки): по железорудным материалам по суммарному углероду	 4,326 1,008	 4,305 1,003	 4,336 1,002
Рудная нагрузка, т/т	3,668	3,658	3,694
Содержание Fe в шихте,%	57,5	57,5	57,3

Ухудшение фильтрующей способности коксовой насадки во втором периоде по сравнению с первым сопровождалось снижением коэффициента замены кокса орешком с 0,64 до 0,59 кг/кг. В периоде III в условиях повышенной равномерности поступления коксового орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи по сравнению с периодами I и II улучшилась проницаемость коксовой насадки, что сопровождалось увеличением коэффициента замены им кокса до 0,85 кг/кг.

Увеличение равномерности поступления орешка из бункера в периоде III сопровождалось повышением интенсивности по газу и снижением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока (табл. 5), рассчитанного по формуле:

$$\lambda = h / h_д$$

где: h — потери напора газа; $h_д$ — динамический напор газа.

При повышении коэффициента равномерности в периоде III степень прямого восстановления Fe из FeO снизилась с 39,6 до 38,7%, степени восстановления монооксидом углерода и водородом повысились с 29,7 до 30,0% и с 30,7 до 31,3% соответственно (табл. 6).

Таблица 5. Показатели интенсивности и сопротивления шихты.

Показатели	Периоды		
	I	II	III
Интенсивность по газу, м³/мин на 1 м³ полезного объема печи:			
колошниковому	3,12	3,37	3,59
фурменному	2,79	3,02	3,24
в распаре	2,92	3,15	3,38
в шахте	3,01	3,25	3,48
Коэффициент сопротивления шихты движению газов:			
на колошнике	1,3	1,2	0,8
в распаре	10,3	8,9	6,6
в горне	6,1	5,2	3,8

Таблица 6. Показатели хода восстановления Fe из FeO.

Показатели	Периоды		
	I	II	III
Степень восстановления Fe из FeO различными восстановителями,%:			
углеродом	39,6	39,9	38,7
монооксидом углерода	29,7	33,4	30
водородом	30,7	26,7	31,3

Смена режима загрузки добавочных материалов в скип с «добавки наверх скипа» на «добавки на дно скипа» в периоде V и VIII сопровождалось повышением равномерности распределения материалов по окружности печи. Об этом свидетельствует уменьшение градиента температур газа на периферии (табл. 7). Изменение распределения материалов и газов в периоде V по сравнению с периодом IV из-за уменьшения доли окатышей в периферийной зоне сопровождалось понижением разности средних величин температур периферийного газа в шахте по окружности и в газоотводах ($T_{пер}$–$T_{кол}$) на 3 °C (табл. 7). Это сопровождалось ростом производительности печи от 3611 до 3647 тонн чугуна в сутки.

Таблица 7. Основные технологические показатели работы доменной печи в периоды IV-VIII.

Наименование показателей	Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ,%				
	0	100	17	0	100
Номер период	IV	V	VI	VII	VIII
Режим загрузки добавочных материалов в скип	верх	дно	верх	верх	дно
Длительность периода, сутки	8	7	7	5	5
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:					
фактический	456,7	455,6	458,6	490,7	488,8
приведенный	—	455,9	451,7	—	489
Расход коксовой фракции, кг/т чугуна	15,4	14,8	10,3	10,9	10,6
Суммарный удельный расход кокса (фактический), кг/т чугуна	469,1	466,5	466,9	501,6	499,4
Производительность, т/сутки:					
по фактическому количеству загруженных подач	3611	3647	3618	3290	3393
приведенная	—	3666	3696	—	3325
Расход сырьевых материалов, кг/т чугуна	1691	1690	1703	1696	1695
Доля окатышей от ЖРС,%	30	30	28	38	45
Интенсивность хода:					
по дутью, $(м^3/мин)/м^3$	1,97	1,94	1,98	1,95	1,98
по суммарному углероду $т/(м^3 \cdot сутки)$	0,99	0,98	1,01	0,99	1,01
Рудная нагрузка, т/т (больше знаков)	3,703	3,719	3,713	3,456	3,467
Содержание Fe в шихте,%	57,4	57,5	57,0	57,3	57,3
Градиент температуры газа, ^0C:					
в газоотводах	6,6	3,6	2,2	60	39
на периферии под газоотводами	75	64	54	142	16
на периферии в шахте	219	246	205	327	292
$(T_{пер}—T_{кол})$, ^0C	204	201	191	153	164
Среднеарифметическая температура холодильников шахты, ^0C	22,8	22,4	22,7	42,2	43,0

В периоде VI размещение окатышей в слое агломерата обеспечивало более равномерное их поступление в колошниковое пространство печи, на что указывает снижение градиента температур в газоотводах от 3,6 до 2,2 °С, на периферии под газоотводами от 64 до 54 °С и на периферии в шахте печи от 246 до 205 °С (табл. 7). Это сопровождалось повышением производительности печи, приведенной к условиям базового периода, на 30 т/сутки (табл. 7).

Для условий ОАО «ММК» использование режима «добавки на дно скипа» целесообразно в условиях ее работы с повышенной долей окатышей, поскольку по результатам исследований установлено, что рост доли окатышей на 1% в интервале 40-60% сопровождался увеличением температуры холодильников шахты в среднем на 1,1 °С (рис. 6). Нарушения в службе холодильников начинались через 3-6 месяцев после превышения доли окатышей 30%.

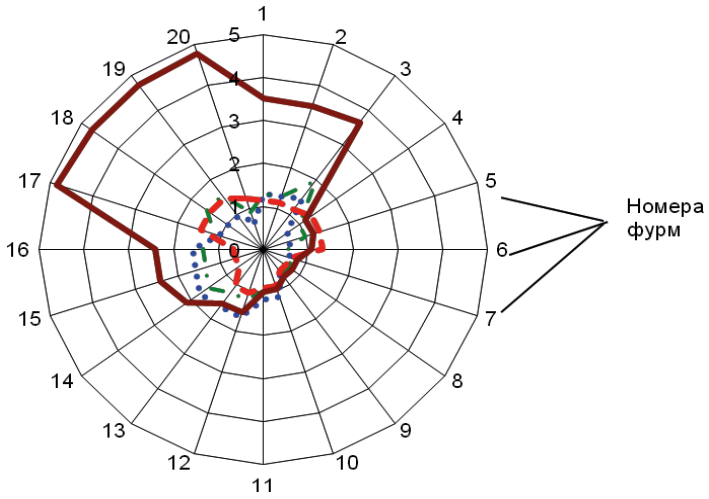


Рис. 6. Плотность теплового потока по внутренним виткам холодильников 6-го ряда шахты, тыс. ккал/(м²·час) при доле окатышей в интервале 45-50% (• • •), 60-65% (— •), 55-60% (—) и в предшествующие 5 месяцев (— – –)

Приближение окатышей к футеровке в периоде VI по сравнению с периодом V сопровождалось увеличением средней температуры тела холодильников шахты на 0,30 °С (табл. 7). Отдаление части окатышей от кладки печи при постоянной их доле, равной 30% от железорудной части шихты, в периоде V по сравнению с периодом IV сопровождалось уменьшением средней температуры холодильников шахты на 0,4 °С. Такое изменение в режиме загрузки предотвратило возможное увеличение температуры холодильников шахты на 7,7 °С из-за увеличения доли окатышей от 38 до 45% в периоде VIII по сравнению с периодом VII. В результате увеличение средней температуры холодильников шахты составило только 0,8 °С (табл. 7).

Работа доменных печей объемом 1370 и 2014 м^3 длительностью два месяца при доле окатышей 35–41% с использованием режима загрузки, отдаляющего окатыши от футеровки, показала, что он способствует сохранению системы охлаждения шахты, распара и заплечиков, благодаря формированию гарнисажа, что подтверждается понижением средних температур тела холодильников на 6,3 °С.

ВЫВОДЫ

1. Регрессионным анализом выявлено, что равномерность распределения железорудных материалов по окружности колошникового пространства доменной печи в значительной степени зависит от расхода окатышей и последовательности расположения компонентов шихты в шихтовом бункере БЗУ.
2. Физическим моделированием и промышленными экспериментами установлено, что наиболее высокую равномерность распределения железорудного сырья в колошниковом пространстве печи обеспечивала следующая последовательность загрузки материалов в бункер БЗУ: на дно шихтового бункера 25% агломерата, затем окатышей, далее загрузка оставшегося 75% агломерата. В среднем замена режима загрузки «добавки наверх скипа» на разработанный режим обеспечивала экономию удельного расхода кокса 0,7% и повышение производительности печи на 2%.
3. Наиболее высокую равномерность распределения коксового орешка обеспечивала загрузка его в средний слой железорудных материалов. По результатам исследований тремя периодами опытных плавок на одной из доменных печей ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» повышение коэффициента равномерности поступления коксового орешка из бункера в колошниковое пространство печи с 0,13 до 0,85 сопровождалось улучшением фильтрующей способности коксо-

вой насадки в горне печи. Количество остающегося в печи шлака сократилось с 14,1 до 9,9 тонн, интервал времени от начала выпуска продуктов плавки до появления шлака уменьшился с 18,4 до 15,1 мин, его вязкость снизилась с 0,64 до 0,25 Па·с.

4. Улучшение проницаемости коксовой насадки в горне для продуктов плавки путём повышения равномерности поступления коксового орешка из бункера в колошниковое пространство печи сопровождалось увеличением коэффициента замены им кокса с 0,59 до 0,85 кг/кг. Степень прямого восстановления Fe из FeO снизилась с 39,9 до 38,7%, степени восстановления монооксидом углерода и водородом повысились с 33,4 до 30,0% и с 26,7 до 31,3% соответственно.
5. Для условий ОАО «ММК» использование режима «добавки на дно скипа» целесообразно в условиях ее работы с повышенной долей окатышей. Отдаление части окатышей от кладки печи способствовало сохранению стойкости системы охлаждения шахты, распара и заплечиков, благодаря формированию гарнисажа, что подтверждается понижением средних температур тела холодильников на 6,3 °С.

Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием высшего образовательного учреждения.

Список литературы

1. Чевычелов А.В., Харченко А.С., Сибагатуллин С.К. и др. / Рациональный режим загрузки коксового орешка в шихтовый бункер БЗУ // Сталь 2013. № 7. С. 8–10.
2. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А., Тлеугабулов Б.С. и др. / Анализ особенностей формирования порций и истечения материалов из бункера БЗУ при загрузке шихты // Сталь 2008. № 6. С. 14–19.
3. Huatao ZHAO, Minghua ZHU, Ping DU, Seiji TAGUCHI, Hongchao Wei. Uneven Distribution of Burden Materials at Blast Furnace Top in Bell-less Top with Parallel Bunkers. ISIJ. 2012. 52. # 12. PP. 2177–2185.
4. Сибагатуллин С.К., Харченко А.С., Бегинюк В.А. / Технологические решения для организации доменного процесса // Металлург. 2014. № 4. С. 64–71.
5. Buchwalder J., Dobroskok V.A., Lonardi E., Goffin R., Thillen G., Köhler S. Contemporary blast furnace top charging practices. Stahl und Eisen. 2008. # 4. Pp. 47–54.
6. Yongfu Zhao, Jerry C. Capo, Steven J.McKnight et al. Development of burden distribution technology at U.S. Steel Canada's. Hamilton Works 'E' blast furnace. Iron & Steel Technology. 2011. # 1. Pp. 52–61.
7. Michinori Hattor, Bungo Iino, Akio Shimomura, Hideaki Tsukiji, Tatsuro Ariyama. Development of Burden Distribution Simulation Model for Bell-less Top in a Large Blast Furnace and Its Application. ISIJ International. 1993 Vol. 33 (1993) # 10. Pp. 1070–1077.
8. Juan Jiménez, Javier Mochón, Jesús Sainz de Ayala. Mathematical Model of Gas Flow Distribution in a Scale Model of a Blast Furnace Shaft. ISIJ International. 2004. Vol. 44. # 3. Pp. 518–526.
9. Тонких Д.А., Кариков С.А., Тараканов А.К., Ковальчик Р.В., Костомаров А.С. Совершенствование режимов загрузки шихты и дутья на доменных печах ПАО «МК «АЗОВСТАЛЬ». Металлург 2013 № 9. С. 42–48.
10. S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, G.N Logachev. The rational mode of nut coke charging into the blast furnace by compact trough-type charging device. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. 86, pp. 531–537.
11. Курунов И.Ф. / К вопросу об эффективности применения на доменных печах различных загрузочных устройств // Металлург. 2009. № 11. С. 34–41.
12. S. Watakabe, K. Takeda, H. Nishimura, S. Goto, N. Nishimura, T. Uchida, M. Kiguchi // ISIJ International. 2006. Issue 4. pp. 513–522.
13. E. Mousa, D. Senk, A Babich. Reduction of Pellets-Nut Coke Mixture under Simulating Blast Furnace Conditions // Steel Research International. 2010. V 81. Issue 9. pp. 706–715.

14. D. J. Gavel (2016): A review on nut coke utilisation in the ironmaking blast furnaces, Materials Science and Technology, DOI: 10.1080/02670836.2016.1183073.
15. О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.В. Лавров, И.Е. Косаченко, В.Ю. Рыболовлев / Оценка формы зоны вязкопластичных масс железорудных материалов в доменной печи методом математического моделирования. Известия высших учебных заведений // Черная металлургия. 2013. № 6. С. 24–29.
16. Лавров В.В., Спирин Н.А., Бурыкин А.А. и др. / Разработка моделирующей системы расчета теплообменных процессов и оценки параметров зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов в доменной печи // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013. № 4. С. 34–38.
17. Charging behavior in a bell-less blast furnace based on 3D discrete element method. Zhang, J.-L., Qiu, J.-Y., Guo, H.-W. Journal of University of Science and Technology Beijing. 2013. T35, #12 PP/ 1643–1652.
18. Сибагатуллин С.К., Харченко А.С., Теплых Е.О. и др. Сравнение качества коксового орешка различного вида. Кокс и химия. 2012. № 2. С. 29–32.
19. Сибагатуллин С.К., Харченко А.С. Выявление рациональной последовательности набора компонентов сырья в бункер БЗУ лоткового типа физическим моделированием. Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 28–34.
20. Neterr J, Wasserman W, Kuntez M. Applied linear regression models. Homewood, IL: Irwin, 1989.

И.Э. Шепетовский, Р.И. Нуриев, К.В. Мясников, Е.В. Иванов, Д.А. Набока, ПАО «Косогорский металлургический завод»

ДОМЕННАЯ ПЛАВКА ВЫСОКОЧИСТОГО ЧУГУНА НА РУДНОЙ ШИХТЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ ДО 100% КИСЛЫХ ОКАТЫШЕЙ

1. ВВЕДЕНИЕ

Косогорский металлургический завод (КМЗ) позиционирует себя, как производитель высокочистого чушкового чугуна с заданными узкими диапазонами содержания основных элементов в отгружаемых партиях. Отличительной особенностью железорудной шихты доменных печей завода является использование до 100% кислых окатышей. Сегодня в мире только 7–8 доменных печей США и Канады работают на аналогичной шихте. Поскольку на заводе нет агломерационных и коксохимических мощностей, сырьевая база завода представлена исключительно привозными материалами. Одна из доменных печей завода выплавляет доменный ферромарганец, что диктует необходимость формирования массивов железорудных и марганцеворудных материалов со строгим разграничением фронтов складирования и внутризаводских потоков перемещения. На заводе нет мощностей по производству кислорода, поэтому доменные печи работают на воздушном дутье. Данный доклад посвящен работе доменных печей металлургического завода неполного цикла в условиях комбинирования вышеуказанных производственно-технологических особенностей.

Химический состав выплавляемого чугуна нодулярнорго класса представлен в табл. 1. Максимально допустимое содержание таких элементов как фосфор, марганец, титан и хром в нодулярном чугуне значительно ниже содержания этих элементов в типовом передельном чугуне. Предельное содержание серы в нодулярном чугуне соответствует первой категории по ГОСТ, при этом на заводе отсутствуют агрегаты внепечной десульфурации.

Таблица 1. Нодулярный чугун ([Si]=0,2–0,5%, диапазон Si1; [Si]=0,5–1,2%, диапазон Si2).

	S,%	P,%	Mn,%	Ti,%	Cr,%
Максимальное содержание	0,010	0,040	0,040	0,020	0,007
Типовое содержание	0,007–0,010	0,028–0,040	0,025–0,040	0,007–0,020	0,005–0,007

Последние требования потребителей продиктовали необходимость снижения верхних пределов содержания некоторых из вышеуказанных элементов, а также расширения набора примесных элементов, содержание которых в нодулярном чугуне должно быть ограничено. Так, с 2015 г. в ряде технических спецификаций на нодулярный чугун требуется ограничение содержания серы до 0,009%, фосфора до 0,035%, марганца до 0,035%. В то же время, добавились ограничения по содержанию в нодулярном чугуне ванадия (до 0,006%) и бора (до 0,0015%).

Таким образом, в нодулярном чугуне КМЗ ограничивается содержание не только традиционно вредных примесей, таких как сера и фосфор, но и условно полезных, легирующих элементов. Очевидно, что в производстве отливок из высокопрочного чугуна для сфероидизации графита необходимо минимизировать содержание всех примесных элементов. Однако, и в производстве качественных сталей технологи предпочитают организовать ввод легирующих добавок в виде ферросплавов и на строго определенных стадиях плавки.

Поскольку в некоторых случаях требования потребителей чугуна смягчаются по ряду ограничений содержания примесей, в линейку продукции КМЗ включен полунодулярный чугун. Химический состав полунодулярного чугуна представлен в таблице 2.

Таблица 2. Полунодулярный чугун ([Si]=0,2–1,2%).

	S,%	P,%	Mn,%	Ti,%	Cr,%
Максимальное содержание	0,015	0,050	0,050	0,025	0,010
Типовое содержание	0,009–0,015	0,035–0,050	0,030–0,050	0,015–0,025	0,005–0,009

Наличие такого чугуна в структуре заказов позволяет нивелировать периодические изменения качественных характеристик поступающего сырья и «выпады» содержания отдельных элементов за пределы спецификаций нодулярного чугуна. Наиболее распространенные случаи предполагают получение чугуна, не соответствующего ограничительным требованиям нодулярного чугуна по одному из примесных элементов, т.е. ограничения по остальным примесям соответствуют нодулярному чугуну.

Ниже представлен химический состав шихтовых материалов, используемых при выплавке нодулярного или полунодулярного чугуна.

В состав железорудной шихты входят:

- Кислые окатыши (63% Fe) — 96,5–98% в составе железорудной шихты
- Железная руда (41–43%Fe, 38–40% SiO_2) — 2–3,5% в составе железорудной шихты
- Флюсы (известняк + доломит*) ≈ 400 кг/т чугуна
- Кокс: Зола — 11,5–12,5%, CSR — 50–55%

* доломитизированный известняк.

2. ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ НОДУЛЯРНОГО И ПОЛУНОДУЛЯРНОГО ЧУГУНА

К факторам, осложняющим процесс плавки чугунов нодулярного и полунодулярного класса, следует отнести:

- Железорудная шихта, состоящая практически полностью из кислых окатышей, что предполагает формирование агрессивного первичного шлака с высоким содержанием FeO, а также высокие колебания температур «горячей» стороны футеровки в срединной зоне доменной печи
- Расход сырых флюсов на уровне 400 кг/т чугуна, предполагающий особые требования к применяемым системам загрузки и формируемому шлаковому режиму
- Производственная программа, предполагающая перевод печи дважды в месяц с выплавки литейных марок на передельные (нодулярный и полунодулярный) марки чугуна, и наоборот, что влечет образование нестабильного слоя гарнисажа
- Необходимость поддержания основности шлака CaO/SiO_2 на уровне не менее 1,16 ед. для получения требуемого предельного содержания серы в чугуне
- Отсутствие установок внепечной десульфурации
- Отсутствие возможности комплексного применения промывочных материалов из-за наличия в них примесных элементов, лимитируемых спецификациями на получаемый чугун.

В доменном цехе КМЗ имеется 3 доменные печи. В последние годы предполагается выполнение заводской производственной программы по выплавке чугуна при работе одной из двух доменных печей, вторая печь находится в резерве, а третья печь (как правило, доменная печь № 2) выплавляет ферромарганец. Основные характеристики доменных печей, на которых выплавляется нодулярный и полунодулярный чугун, а также литейные марки чугуна, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Основные характеристики доменных печей КМЗ, выплавляющих нодулярный и полунодулярный чугун.

Доменная печь № 1		Доменная печь № 2	
• Ввод в эксплуатацию	февраль 2010 г.	• Ввод в эксплуатацию	март 2015 г.
• Рабочий объем	944 м^3	• Рабочий объем	686 м^3
• Полезный объем	1066 м^3	• Полезный объем	759 м^3
• Диаметр горна	7,2 м	• Диаметр горна	6,0 м
• Опорная конструкция	свободно стоящая, безмараторная	• Опорная конструкция	мараторная с опиранием на 4 колонны
• Количество воздушных фурм	16	• Количество воздушных фурм	12
• Количество чугунных леток	2 (угол между летками 450)	• Количество чугунных леток	1
• Диаметр колошника	5,8 м	• Диаметр колошника	5,0 м
• Тип шихтоподачи	конвейерная, двухсторонняя	• Тип шихтоподачи	вагон-весы
• Подача материалов на колошник	скиповый подъемник, объем скипа 6,5 м^3	• Подача материалов на колошник	скиповый подъемник, объем скипа 4,5 м^3
• Засыпной аппарат	мини-БЗУ Paul Wurth	• Засыпной аппарат	двухконусное загрузочное устройство

3. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ДОСТИЖЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ №№ 1, 3

В настоящее время в доменном производстве четко прослеживается тенденция замены сырья сверхвысокого качества на сырье, которое экономически целесообразно применять в доменной плавке, т.е. во главу угла ставится оптимизация доменного процесса.

Реализуемые на доменных печах КМЗ технологические мероприятия направлены не только на достижение экономичных показателей плавки и получение чугуна заданного химсостава, но и на обеспе-

чение сохранности системы охлаждения и футеровки доменной печи. Требуется подобрать оптимальную толщину формируемого гарнисажа для защиты элементов системы охлаждения:

- чрезмерно тонкий слой ⟶ неэффективная защита
- чрезмерно толстый слой ⟶ неустойчивый гарнисаж

На доменной печи №1 задача формирования гарнисажа осложняется приближением профиля срединных зон печи к цилиндрической форме. На доменной печи №3 решение указанной задачи несколько облегчается за счет наличия мараторной «подпорки»: толщина футеровки в районе маратора достигает 805 мм.

Среди основных мероприятий, реализуемых на печах при выплавке нодулярного и полунодулярного чугуна, следует отметить:

- Варьирование загрузки сырых флюсов по скипам
- Поддержание соотношения известняк/доломит в шихте на уровне 75% / 25%, что предполагает формирование шлака с модулем основности MgO/Al_2O_3 в диапазоне 1,10–1,25 ед.
- Равномерное окружное распределение выгружаемых материалов за счет высокой скорости вращения лотка (13 оборотов в минуту) на доменной печи №1 обеспечивает замкнутость колец при загрузке относительно малых порций добавочных материалов
- Применение на доменной печи №1 матриц загрузки, предполагающих создание осевой коксовой отдушины и формирование первичного шлака в периферийной области с относительно низким содержанием FeO: наибольшую эффективность показали 2 типа разработанных матриц:
- «симметричная» загрузка основной части порции кокса с равным распределением на 2 крайних периферийных и 2 осевых станциях выгрузки
- «концентрированная» загрузка рудной части на 5 станций выгрузки в срединной части радиуса колошника
- Применение на доменной печи № 3 систем загрузки 4 (3) п PPKK↓ + 1 (2) п KPPK↓ с поддержанием температуры периферийных газов в диапазоне 400–550 °С.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качество кокса, содержание железа в шихте, вдувание топливно-восстановительных добавок, система загрузки, содержание кислорода в дутье и другие параметры — это инструменты оптимизации доменного процесса. Однако следует понимать, что эффективность применения данных инструментов в решении любой производственной задачи зависит от людей, которые ими пользуются, т.е., от технологического персонала.

Наряду с тенденцией замены сырья сверхвысокого качества на сырье, экономически целесообразное к применению в текущих условиях, необходимо отметить еще одну тенденцию развития современного доменного производства, предполагающую повышение требований к технологическому персоналу. На данном этапе развития доменного производства требуются не просто люди, добросовестно выполняющие свои обязанности, а люди, которые способны выполнить оперативный анализ и правильно интерпретировать полученную информацию. На первый взгляд, указанными характеристиками должны обладать только руководители подразделений, работники инженерных и аналитических служб, но это не так. Именно от людей, непосредственно обслуживающих доменную печь, зависит оптимизация доменного процесса на каждом отдельном предприятии. И решение вопроса обеспечения комплекса доменных печей грамотным персоналом является настоящим вызовом XXI века для металлургии чугуна, что, собственно, и вынесено в заглавие VIII Международного конгресса доменщиков.

В.Н. Титов, Л.С. Ивлева, А.А. Пишикин
ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЛКИХ ФРАКЦИЙ АГЛОМЕРАТА И КОКСА В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Одним из направлений повышения эффективности доменной плавки в условиях ПАО «НЛМК» является использование в структуре доменной шихты мелких фракций агломерата. Основной целью данного мероприятия является вовлечение в производственный процесс неликвидных фракций, что способствует снижению расхода металлургического кокса и бункерного агломерата. Реализация данной технологии осуществлена на доменных печах № 3 (2000 м^3), № 6 (3200 м^3) и ДП «Россиянка» (4290 м^3). На доменных печах №№ 3, 6 загружался агломерат фракции «–5 мм», на ДП «Россиянка» агломерат фракции 4–5 мм, полученный путем пересева отсева агломерата на отдельном грохоте. Особенностью работы доменных печей является их высокая интенсивность (удельная производительность более 2,5 т/(м^3 сут)).

ДП-3. С 01.07.2014 г. в состав шихты на ДП-3 введен отсев агломерата в количестве 0,5 т/под, который загружался вместе с железорудным материалом, в конце наполнения первого скипа. Динамика изменения удельного расхода отсева агломерата, загруженного в доменную печь, приведена на рис. 1. Данный расход являлся первым этапом, по внедрению технологии использования мелких фракций агломерата на ДП-3. Целью данного этапа являлась оценка реакции доменной печи на целенаправленное увеличение фракции «–5» мм в шихте. В условиях отсутствия негативного влияния на газопроницаемость верней части столба шихты (рис. 2), расход отсева агломерата пошагово увеличивали с 0,7 т/под, до 1,5 т/под (декабрь 2014 г.). Следует отметить, что

выбранный способ загрузки отсева агломерата способствовал стабилизации периферийного газового потока при его некотором сокращении (рис. 3).

В январе 2015 г. расход отсева агломерата составлял 1,5 т/под. После отработки технологии применения мелких фракций агломерата с данным расходом, с марта 2015 г. начался второй этап увеличения расхода отсева агломерата в результате которого был достигнут расход в количестве 2,5 т/под, при обеспечении производительности печи 4900 т/сут.

Рис. 1. Динамика изменения удельного расхода отсева агломерата на ДП-3

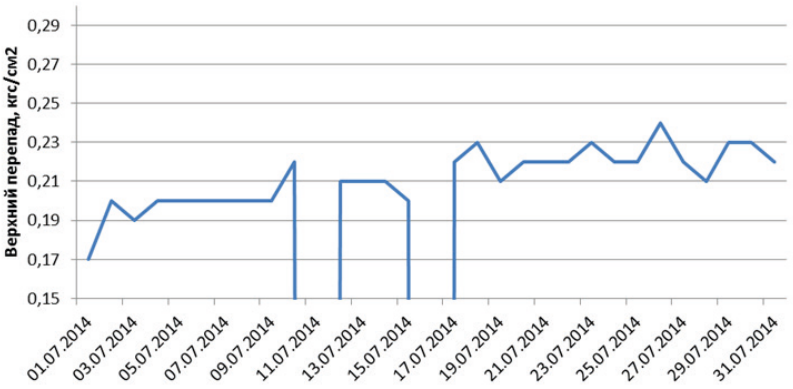


Рис. 2. Динамика изменения верхнего перепада давления на ДП-3

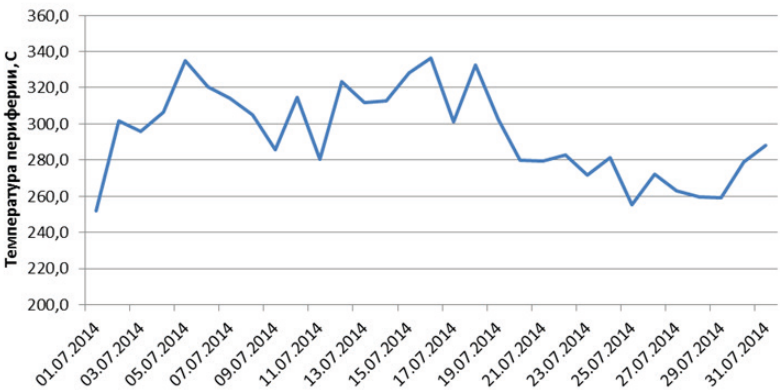


Рис. 3. Динамика изменения температуры периферии

ДП-6. С апреля 2014 г. на ДП-6 в качестве железорудного компонента шихты стали использовать отсев агломерата. Динамика изменения удельного расхода отсева агломерата, загруженного в доменную печь, приведена на рис. 4.

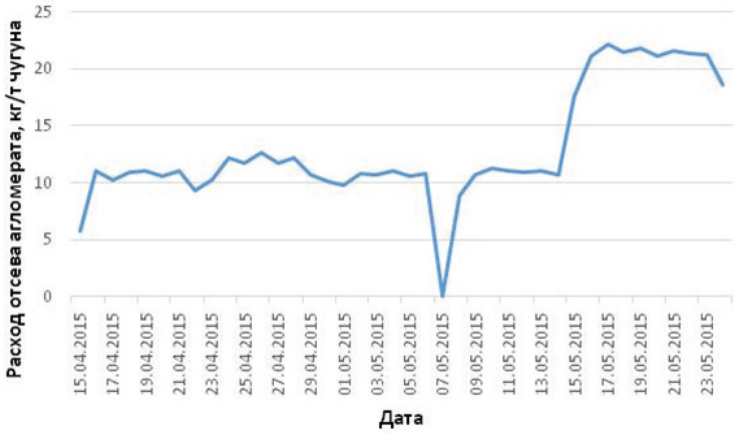


Рис. 4. Динамика изменения удельного расхода отсева агломерата.

Отсев агломерата начали использовать с 15 апреля. До 14 мая расход отсева составлял порядка 10–11 кг/т агломерата, а с 15 мая расход был увеличен до 20–22 кг/т. Первоначально отсев агломерата начинали грузить по 1 тонне в подачу в виде смеси, имеющую следующий состав: (14 т Агл + 26 т КачГОКа + 2 т фр. кокса + 8т кокса + 1 т отсева агл), дополнительно загружали фракцию кокса 15 тонн – 2 раза в цикл. В связи с дестабилизацией газодинамического режима (колебания нижнего перепада) схема загрузки отсева агломерата была изменена. Отсев агломерата загружался в смеси по 2 т, но 1 раз в цикл (1 раз в две подачи), однако улучшений по ходу печи отмечено не было.

В дальнейшем загрузку отсева агломерата осуществляли путем его загрузки во 2-ю и 14-ю строки, в смеси с чистым агломератом без окатышей в количестве 2 т в подачу. С целью замыкания полного кольца и снижения тепловых нагрузок на 3–5 ряде шахты количество отсева агломерата было увеличено до 4 т в подачу.

Оценка технико-экономических показателей. Производительность и расход топлива. Динамика изменения производительности и расхода топлива приведена на рис. 5, 6.

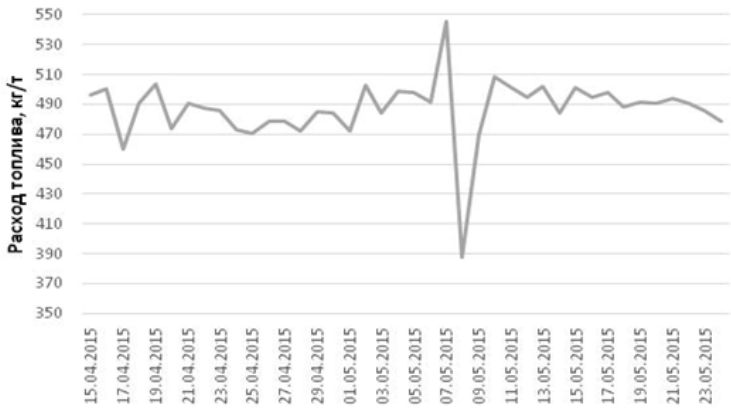


Рис. 5. Динамика изменения расхода суммарного топлив.

Анализ рис. 5, 6 показал, что подбор системы загрузки позволил исключить негативное влияние ввода в структуру шихты отсева агломерата. Производительность печи стабилизировалась на уровне 8800–8900 т/сут, а расход топлива на уровне 485–495 кг/т чугуна.

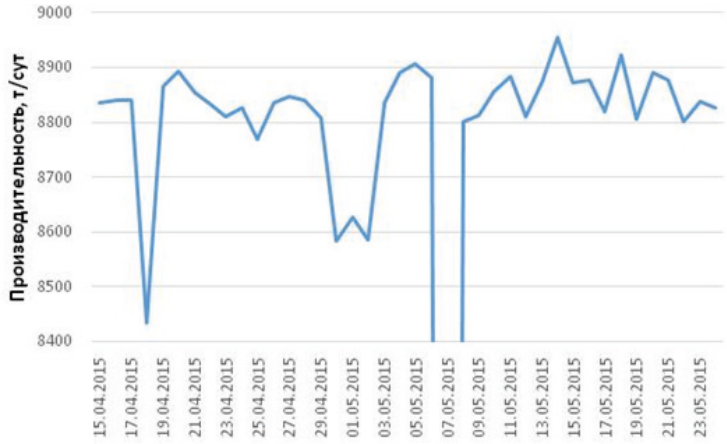


Рис. 6. Динамика изменения производительности ДП-6 в период использования отсева агломерата

Оценка газодинамики. В качестве показателей, характеризующих газодинамику доменной печи в период потребления отсева агломерата, использовались верхний перепад давления, температура периферии, среднеквадратичное отклонение температуры периферии (рис. 7–9).

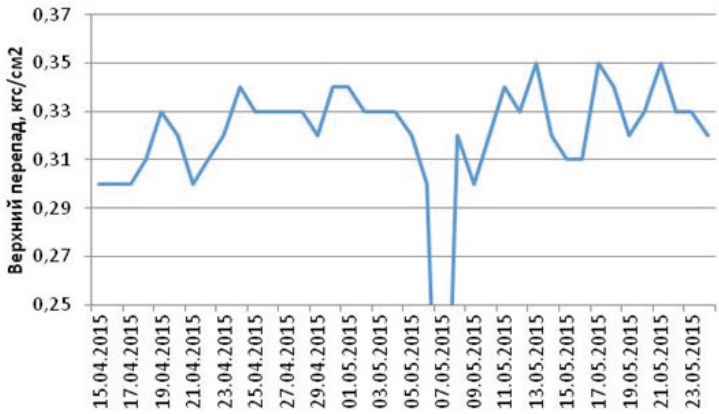


Рис. 7. Динамика изменения верхнего перепада давления

Рис. 8. Динамика изменения температуры периферии

Рис. 9. Динамика изменения стандартного отклонения температуры периферии

Применение мелких фракций агломерата повлекло за собой несущественное повышение верхнего перепада, что способствовало повышению степени использования восстановительной способности газа с 48,5–49,5% до 49,5–50,5%. При этом произошла стабилизация температуры периферийного газа (СКО температуры периферийного газа изменилось с 30–40 °С до 15–25 °С, что свидетельствует об улучшении газораспределения в пристенной области колошника (снижение окружной неравномерности). Снижения температуры периферийного газа не наблюдалось. Таким образом, отработана технология использования отсева агломерата в доменной печи большого объема в условиях высокоинтенсивной доменной плавки без ухудшения технико-экономических показателей работы печи с расходом до 20 кг/т чугуна.

ДП «Россиянка». Начиная с четвертого квартала 2014 г. на ДП «Россиянка» начали загружать мелкие фракции кокса (фракция 25–40 мм, коксовый орешек (фракция 10–25 мм), агломерат фракции 4–5 мм).

Оценку эффективности применения данной технологии осуществляли по величине коэффициента замены кокса коксовым орешком. Оценка коэффициента замены кокса коксовым орешком осуществлялась путем анализа показателей работы печи в следующих периодах:

№ периода	Расход орешка, кг/т	Принцип загрузки
1	0	Базовый период
2	4,1	Загрузка в каждую подачу
3	18,3	Загрузка в виде смеси с фракцией агломерата 4–5 мм и кокса фракции 25–40 мм
4	7,8	
5	11,0	
6	17,8	
7	18,6	

При оценке коэффициента замены кокса коксовым орешком было принято, что кокс фракции 25–40 мм имеет коэффициент замены 1,0 кг/кг. Расход кокса был приведен к одинаковым с базовым периодом условиям работы с использованием коэффициентов пофакторного анализа.

Коэффициент замены кокса коксовым орешком рассчитывали по следующей формуле:

$$КЗ = 1 + (K_{баз} - K_{прив}) / КО, \text{ кг/кг} \quad (1)$$

где $K_{баз}$ — базовый расход кокса с учетом кокса фракции 25–40 мм, кг/т;
$K_{прив}$ — приведенный расход кокса с учетом кокса фракции 25–40 мм, кг/т;
КО — расход коксового орешка, кг/т.

Результаты расчета приведены в таблице 1. Графическая интерпретация данных таблицы приведена на рис. 10.

Таблица 1. Приведенный расход кокса, расход коксового орешка и коэффициент замены кокса орешком.

№ периода	1	2	3	4	5	6	7
Расход кокса, кг/т	397,6	397,9	402,9	397,9	398,1	400,2	400,4
Расход орешка, кг/т	0	4,1	18,3	7,8	11,0	17,8	18,6
Коэффициент замены, кг/кг		0,87	0,66	0,91	0,91	0,81	0,80

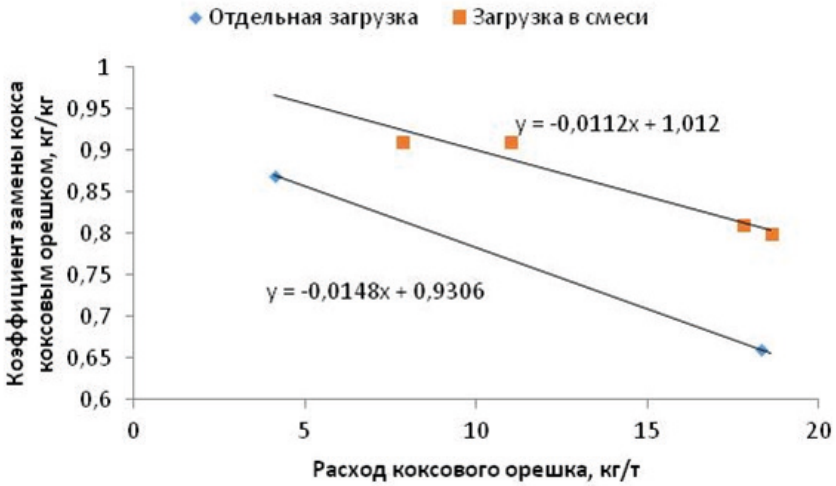


Рис. 10. Зависимость коэффициента замены кокса коксовым орешком от расхода последнего при разном способе загрузке его в печь

Анализ полученных результатов показал, что использование коксового орешка в смеси с мелкими фракциями агломерата положительно сказывается на эффективности его применения. Относительно традиционного способа его загрузки в каждую подачу, загрузка в смеси способствует увеличению коэффициента замены кокса на 0,1–0,15 кг/кг. При этом отмечено, что влияние расхода коксового орешка на коэффициент замены ослабевает. Это выражается в меньшем угле наклона прямой и коэффициенте регрессии в уравнении. Так при загрузке орешка в каждую подачу увеличение его расхода (в диапазоне от 0 до 20 кг/т) на 10 кг/т снижает коэффициент замены на 0,15 кг/кг, а при его загрузке в смеси аналогичное увеличение приводит к снижению коэффициента замены на 0,11 кг/кг.

Повышение эффективности применения коксового орешка отдельной порцией в смеси с мелкими фракциями агломерата относительно загрузки в смеси с основной массой железорудной порцией обусловлено:

- Особенностью загрузки мелких фракций агломерата и коксового орешка в каждую подачу вместе с железорудной порцией подачи является расположение небольшого количества данных материалов отдельными секторами, а не замкнутыми кольцами что ухудшало обработку данных материалов газовым потоком.
- Загрузка смеси данных фракций отдельной порцией (отдельной строчкой в матрице загрузки) гарантировало замыкание колец и, как следствие, улучшало обработку данных материалов газовым потоком, степень использования химической энергии, которого при этом увеличивалась (рис. 11), что в итоге повышало коэффициент замены кокса коксовым орешком.

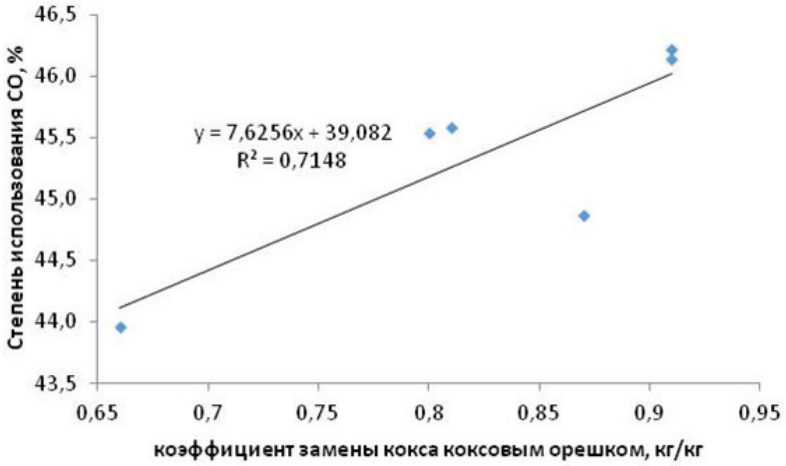


Рис. 11. Взаимосвязь степени использования СО и коэффициента замены кокса коксовым орешком.

Таким образом, при существующих расходах мелких фракций агломерата и кокса загрузка коксового орешка в смеси с мелкой фракцией агломерата и отдельной порцией способствует увеличению коэффициента замены кокса орешком на 0,1–0,15 кг/кг. Анализ работы ДП «Россиянка» показал, что расход агломерата фракции 4–5 мм может быть увеличен до 65–70 кг/т с пропорциональным увеличением расхода мелких фракций кокса (в т.ч. коксового орешка).

ВЫВОДЫ

1. В ПАО «НЛМК» отработана технология применения мелких фракций агломерата и кокса в условиях высокоинтенсивной работы (удельная производительность более 2,5 т/(м^3 сут)).
2. Достигнуто использование отсева агломерата с удельным расходом 20–100 кг/т чугуна в зависимости от объема доменной печи (больший расход соответствует печи меньшего объема).
3. Результаты анализа показали, что применение коксового орешка в смеси с мелкими фракция агломерата с загрузкой их отдельной порцией способствует повышению эффективности использования коксового орешка в доменной печи, по сравнению с его загрузкой в смеси с основной массой железорудной части шихты.
4. Загрузка в смеси с мелкой фракцией агломерата и отдельной порцией способствует увеличению коэффициента замены кокса орешком на 0,1–0,15 кг/кг. При этом влияние расхода коксового орешка на коэффициент замены ослабевает. При расчетах можно принимать коэффициент замены кокса коксовым орешком равным 0,90 кг/кг при его расходе до 10 кг/т, и равным 0,80 кг/кг — при расходе орешка в диапазоне 10–20 кг/т.
5. Основной причиной повышения эффективности использования коксового орешка является улучшение работы газового потока за счет увеличения площади и времени его контакта с мелкой фракцией агломерата, что выражается в повышении степени использования СО.

А.А. Ткач, В.А. Петренко, А.Я. Ткач, ПАО «Днепрогидромаш»

ВЫПУСК ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ ИЗ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ХОД ПРОЦЕССА. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ВОПРОСА

Выпуск продуктов плавки из рабочего объема горна является одним из основных технологических процессов, определяющих устойчивую работу доменной печи. Как отмечали авторы /1/, график выпусков должен составляться с учетом условий работы каждой конкретной доменной печи. При нарушении графика выпусков в сторону преждевременного открытия летки, происходит уменьшение рабочего объема горна за счет проседания столба шихтовых материалов на лещадь, и как следствие возникает загромождение горна. При задержке выпуска происходит накопление в горне чугуна и шлака и подъем уровня расплава. Резкое опорожнение горна от большого количества продуктов плавки приводит к значительному ускорению схода шихты и как результат — похолодание, что отрицательно влияет на процесс плавки.

Кроме того, при определенных условиях выпуска, в горне у лещади формируются зоны с повышенными локальными скоростями (в 10–20 раз) течения расплава, что приводит к значительному росту тепловых нагрузок на слои футеровки и в сочетании с цикличностью нагрева и охлаждения может считаться основным фактором, определяющим ее износ и разрушение, считают авторы /2/.

Равномерность выхода чугуна и шлака зависит от многих факторов /3/. Физико-химических характеристик жидких чугуна и шлака, геометрических размеров летки (диаметр, длина) и количества открытых леток, временных характеристик цикла «пауза–выпуск», интенсивности накопления продуктов плавки в горне, высоты горна, рабочего давления в печи, качества кокса и коксовой насадки в объеме горна, а также его состояние, зависящее от количества жидкости в металлоприемнике.

Равномерный выпуск продуктов плавки из печи способствует ровному сходу шихты, развитию необходимого газового потока, стабильному тепловому состоянию и как следствие — производительной работе агрегата. В этой связи регулирование интенсивности выхода продуктов плавки из доменной печи играет немаловажную роль в протекании всего процесса плавки, которому до настоящего времени не предается должного внимания.

В данной работе преследуется цель — изучение влияния скорости выпуска продуктов плавки на показатели работы печи.

1. ДВИЖЕНИЕ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ ЧЕРЕЗ ЧУГУННУЮ ЛЁТКУ

Равномерный выпуск продуктов плавки из печи способствует ровному сходу шихты, развитию необходимого газового потока, стабильному тепловому состоянию и как следствие — производительной работе агрегата. В этой связи регулирование интенсивности выхода продуктов плавки из доменной печи играет немаловажную роль в протекании всего процесса плавки, которому до настоящего времени не предается должного внимания. В этой связи, в данной работе преследуется цель — изучение влияния, скорости выпуска продуктов плавки на показатели работы печи.

Скорость жидкости K, вытекающей через отверстие в стенке сосуда, определяется формулой Торричелли [3]:

$$V = \varphi \cdot \sqrt{2gH} \qquad (1.1),$$

где H — расстояние от оси отверстия до поверхности жидкости; φ — коэффициент скорости.

В доменной печи скорость жидких продуктов плавки определяется не только давлением чугуна высотой $H_ч$, но и шлака $H_ш$, давлениями газа $P_{изб}$ и веса шихты $F_в$, соприкасающейся со шлаком и чугуном за вычетом подпорной силы газа ΔP, как показано на рисунке 1.1.

Силы давления в единицах паскаль (Н/м) рассчитываются исходя из произведения плотности и толщины тела, умноженных на ускорение свободного падения. Пересчитаем давления вышеназванных сил в условиях доменной печи полезным объёмом 1033 м завода им. Петровского. В полном горне количество чугуна равно двум третям объёма горна и одной трети шлака. Таким образом, сила давления чугуна на площадь горна по оси чугунной лётки равна:

$$F_ч = g\gamma_ч \times h_г \times 0{,}67 = 9{,}81 \times 6600 \times 3{,}2 \times 0{,}67 = 138\,815 \text{ Па} \qquad (1.2)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с ; $\gamma_ч$ — плотность чугуна, кг/м^3; $h_г$ — высота горна, м.

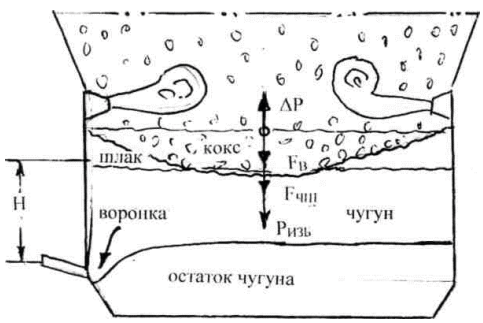


Рис.1.1. Схема сил, действующих на жидкие продукты плавки в горне доменной печи при выпуске чугуна и шлака

Сила давления шлака согласно формуле (1.2)

$$F_{шл} = g\gamma_{шл} \times h_г \times 0{,}33 = 9{,}81 \times 2760 \times 3{,}2 \times 0{,}33 \approx 28\,592 \text{ Па},$$

где $\gamma_{шл}$ — плотность шлака, кг/м^3.

Поскольку сила давления горнового газа на поверхность жидких продуктов плавки приведена в избыточных атмосферах, то переведём её в паскали:

$$P_{изб} = 2{,}35 \times 98\,066 = 230\,455 \text{ Па} \quad (1.3)$$

Подпорная сила шихты газовым потоком равна:

$$\Delta P = 1{,}23 \times 98\,066 = 120\,621 \text{ Па} \quad (1.4)$$

Давление столба шихты на поверхность жидких продуктов плавки в горне рассчитаем, исходя из формул (1.2) и (1.4):

$$F_в = g\gamma_ш \times (h_к + h_ш + h_р + h_з) — \Delta P =$$

$$= 9{,}81 \times 1200 \times (2{,}8 + 15 + 2 + 3) — 120\,621 = 268\,401{,}6 — 120\,621 = 147\,780{,}6 \text{ Па}, \quad (1.5)$$

где $\gamma_ш$ — насыпной вес шихты, кг/м^3; $h_к$, $h_ш$, $h_р$, $h_з$ — соответственно высоты колошника, шахты, распара и заплечиков, м.

Таким образом, как показано на графике рисунка 1.2, максимальное давление на чугун оказывают давление горнового газа в доменной печи, на втором месте давление веса шихты на чугун и шлак. Гораздо меньшее давление оказывает сила веса шлака, опирающаяся на чугун из-за достаточно сильного противодействия перепада давления газа в столбе шихты.

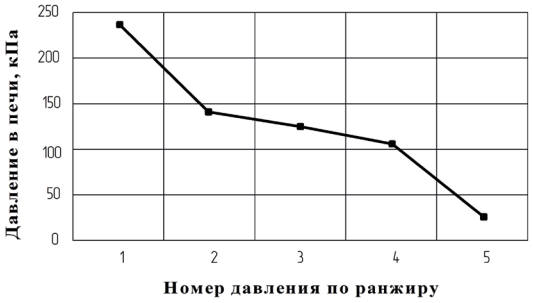


Рис. 1.2. Ранжировка давлений на низ горна в доменной печи при выпуске жидких продуктов плавки:
1 — избыточное давление горнового газа на чугун, 2 — давление веса шихты на чугун и шлак,
3 — давление чугуна на плоскость горна по оси чугунной летки, 4 — противодавление весу чугуна, 5 — давление шлака на чугун

2. ВЛИЯНИЕ ВЫПУСКА НА ХОД ПРОЦЕССА

Анализ работы доменных печей с разной интенсивностью выпуска продуктов плавки показывает, что выпуска протекающие в равномерном режиме в течение времени благоприятно влияют на ход процесса. Чрезмерно длительные выпуска не желательны и приводят к сбою в работе цеха и смежников из-за нарушения контактных графиков производства.

Данные работы доменной печи объемом 1033 м^3 с различной продолжительностью выпусков свидетельствуют, что для сохранения ровного хода печи предпочтение имеют выпуска с продолжительностью от 55 до 75 минут. Интенсивность выхода чугуна при этом составляет 3.8–4.4 т/мин., шлака 2.2–2.4 т/мин.

Отрицательное влияние на показатели работы доменной печи объемом 1033 м^3 оказывают короткие выпуска, или выпуска с высокой интенсивностью выхода продуктов плавки. Выход чугуна в количестве более 5.0 т/минуту приводит к резкому освобождению рабочего пространства горна, просадке шихты

с приходом в горн холодных материалов, что приводит к нарушению теплового состояния агрегата с одновременным загромождением горна, опустившимся на лещадь коксом. Следует отметить, что оптимальная интенсивность выпуска продуктов плавки подбирается для каждой печи индивидуально. Возникающие при этом последствия, связанные с увеличением простоев из-за горения воздушных фурм, необходимостью расхода дополнительного топлива — ухудшают показатели работы доменной печи.

Выпуска с высокой интенсивностью выхода продуктов плавки связаны с большим диаметром канала чугунной летки или интенсивным его разгаром в процессе выпуска.

Интенсивный выход продуктов плавки может привести к выходу горновых газов через летку из-за образования воронки при истечении жидкости, создавая, таким образом, ложное представление о конце выпуска и преждевременному закрытию чугунной летки. В металлоприемнике при этом происходит накопление шлака, которое в ожидании следующего выпуска приводит к переполнению горна и появлению шлака на фурмах, создавая нестандартную ситуацию. Особенно это усугубляется при удельном выходе шлака 450 кг/т и более, так как объемная интенсивность накопления шлака в этих случаях значительно превышает объемную интенсивность накопления чугуна /1/.

Доля продолжительных выпусков на доменных печах незначительна и поэтому их влияние на показатели плавки сказываются в меньшей степени, при условии, что это не связано с нарушением хода печи. Продолжительные выпуска в основном влияют на ритм работы всего цеха и смежных производств, требуют увеличенного парка чугуновозных и шлаковозных ковшей, дополнительных механизмов по их обработке, что влечет дополнительные затраты как денежных средств, так и трудовых ресурсов. Кроме того, после длинных выпусков практически всегда следуют короткие из-за необходимости соблюдения графика и вхождения в него. Следует учесть, что при длинных выпусках нарушается производство горновых операций на печах имеющих один литейный двор и одну чугунную летку.

Таким образом, регулируемая скорость выпуска является одним из источников интенсификации доменного процесса и наряду с оптимальной массой выпуска позволяет достаточно корректно и точно рассчитать и построить график выпусков и работу доменного цеха в целом.

На основании изложенного для регулирования скорости выпуска продуктов плавки из доменной печи необходимо рассмотреть, прежде всего, вопросы связанные :

- со вскрытием летки, с целью получения канала заданного размера, или другими словами, работа оборудования литейных дворов для обслуживания леток;
- устойчивостью канала летки против воздействия физико-химических процессов при выпуске, или качеством огнеупорных масс для закрытия чугунных леток.

3. ОБОРУДОВАНИЕ ЛИТЕЙНОГО ДВОРА

Машины для вскрытия чугунных леток старой конструкции имеют консольное крепление бура, которое не позволяет фиксировано пробуривать канал летки. А при длине бура более 4 метров операция вскрытия канала летки усугубляется из-за прогиба последнего при создании на него усилия нажатия. В результате канал летки разбуривается и разбивается до непредсказуемых размеров, не позволяя отрегулировать интенсивность выпуска. Кроме того, зачастую при вскрытии летки происходит нарушение целостности футляра чугунной летки, что вызывает сложности при ее закрытии, не говоря о повышенных потерях чугуна из-за разбрызгивания. Бурмашины старой конструкции не эффективно используют для вскрытия летки штанг с коронками, что не позволяет получить калиброванный и, относительно, гладкий канал. Чугунная летка, как правило, вскрывается 2–3 бурами, что приводит к дополнительному увеличению ее диаметра.

Электромеханические пушки, применяемые для закрытия летки и особенно с объемом рабочего цилиндра 0,5 м^3, не обладают достаточным усилием для продавливания современных безводных огнеупорных леточных масс в канал летки. В результате 30–40% выпусков осуществляется при длине летки менее 2,0 м или так называемых «коротких» летках. Короткие летки как правило приводят к интенсивному протеканию выпуска жидких продуктов плавки с последствиями указанными выше.

4. ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Применение огнеупорных масс на смоляной основе с влажностью не более 6.0%, также не отвечают требованиям регулированного по интенсивности выпуска продуктов плавки. Это обусловлено коксованием массы в летке, и при наличии кремнеземистой составляющей приводит к образованию соединений в канале сравнимых по твердости с абразивом, что вынуждает применять для вскрытия летки 2–3 бура. В результате канал летки разбуривается до размеров превышающих диаметр пера бура на 20–30 мм, выпуск снова получается интенсивным. Кроме того, масса на смоляной основе разгорается при выходе из печи шлака, который содержит окислы способные вступать в реакцию с углеродом и другими элементами огнеупорной лёточной массы.

Решение поставленных задач можно осуществить в первую очередь за счет реконструкции и переоборудования литейных дворов доменных печей, а также разработки и применения огнеупорных материалов для закрытия чугунных леток новых поколений.

На настоящий момент в Украине 75% доменных печей по прежнему не модернизированы и имеют на литейных дворах старое электромеханическое оборудование, которое уже морально, а на отдельных печах и физически устарело и не отвечает требованию современного уровня производства. И только 25%, из стоящих на балансе доменных печей, имеют современные литейные дворы, оборудованные новой техникой с гидравлическими приводами для закрытия и вскрытия чугунных леток.

Касаясь качества огнеупорных материалов для закрытия чугунных леток необходимо иметь массы со свойствами, позволяющими обеспечить устойчивость размеров канала летки в процессе выпуска чугуна и шлака, а также надежное закрытие летки в любое время выпуска, как это выполняет гидропушка, без потери длины летки. Массы должны производится из материалов имеющихся в Украине и быть достаточно дешевыми и доступными для приобретения металлургическими предприятиями. На сегодняшний день многие зарубежные фирмы, производящие огнеупорные материалы предлагают услуги по поставке новых леточных масс для закрытия чугунных леток. Однако не многие предприятия позволяют себе их приобретение из-за высоких цен и пользуются массами собственного производства.

Зарубежные предприятия, применяющие огнеупорные массы для закрытия чугунных леток нового поколения, которые не требуют предварительной просушки, легко вскрываются практически одним буром, с применением гидравлических машин, избавились от проблем указанных выше. Отечественные доменные печи, на которых произведена реконструкция литейных дворов с установкой нового оборудования с гидравлическими приводами, также имеют возможность избавиться от проблем с выпуском продуктов плавки без регулирования его интенсивности. Однако, качество огнеупорных масс для забивки летки по-прежнему не позволяет регулировать скорость истечения жидкости из горна доменной печи, нарушая при этом ритмичную работу печи.

Разработкой новых леточных масс в Украине никто не занимается из-за отсутствия инвестиций и заинтересованных потребителей. Производство таких масс можно было бы организовать на одном из предприятий по производству огнеупоров, которое обеспечило бы леточными массами все металлургические предприятия Украины.

ВЫВОДЫ

1. Управлению интенсивностью выпуска жидких продуктов плавки из доменной печи необходимо уделять такое-же внимание, как и формированию газового потока.
2. Равномерный выпуск чугуна и шлака из доменной печи способствует ровному сходу шихты, стабильному тепловому режиму и как следствие, производительной работе агрегата.
3. Решение поставленных задач можно достичь за счет проведения модернизации оборудования литейных дворов с установкой гидравлических бурмашин и пушек и одновременным переходом на использование огнеупорных масс нового поколения.

Список литературы

1. Ткач А. А. и др. «Влияние параметров процесса накопления и выпуска жидких продуктов плавки на работу доменной печи» Материалы VI международного конгресса по агло-коксо-доменному производствам; Ялта, Крым, май 2013 г. , стр. 252–260 .
2. Васильев А. П. , Третьяк А. А. , Изюмский Н. Н. и др. «Автоматизированная система управления комплексом доменного производства ОАО «Северсталь», Материалы VII международного конгресса доменщиков, Москва — Череповец , сентябрь 2002 г., стр. 37–57 .
3. Ковшов В.Н. и др. «Газодинамическая оценка процесса накопления продуктов доменной плавки», Известия вузов. Черная металлургия, 1984 г. № 3, с. 29–33.
4. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости). Издание второе. — Л. «Энергия», 1970. 552 с.
5. Ткач А.А. Теоретические расчеты движения жидких продуктов плавки в нижней части горна во время выпуска.

В.А. Курганов, Д.В. Парамонов, А.В. Федько
(ОАО «Черметинформация», ООО «ТОР»)

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ДОМЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЧУГУНОВ ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Развитие машиностроительного комплекса, способного по уровню качества, количества и стоимостным показателям успешно конкурировать на динамично развивающемся рынке, должно сопровождаться адекватными подходами к этим целям со стороны естественных партнеров.

Оценка качества шихтовых материалов литейщиками производится не только по химическому составу, но и по другим характеристикам. Речь в данном случае идет об определенных свойствах, которые формируются в качестве генетического кода в технологическом процессе «выплавка, разливка и кристаллизация». На формирование микро- и макроструктуры отливок оказывают влияние много факторов, в том числе содержание растворенных в расплаве газов, присутствие ряда элементов, попадающих в расплав из шихты, металлодобавок, известняка, шлака, футеровки, условия разливки и т.д. Известно, что элементы-спутники, к которым относится титан, хром, медь, молибден, ванадий, свинец, мышьяк и др., вступая в химические реакции между собой и с основными элементами расплава, создавая сложные растворы, сложные карбиды железа, оказывают влияние на температуру эвтектической кристаллизации и эвтектоидного превращения, способствуют развитию устойчивых межатомных связей во время кристаллизации и охлаждения доменного чугуна. Совокупность указанных элементов и металлургических факторов определяют конечную структуру, создают наследственные свойства доменного чугуна, которые проявляются в готовом литье. Изменение наследственных свойств может достигаться внепечной обработкой чугуна или известными способами, например, изменением доменного процесса, что весьма не выгодно экономически.

Общим недостатком доменных чугунов является крайняя неоднородность структуры — одновременное присутствие в чушке чугуна участков свободного цементита наряду с ферритом и перлитом, колебания формы и размеров графита от точечного и междендритного до крупных изолированных включений пластинчатого графита, который при переплаве полностью не растворяется в железе и может выделяться в отливке как чистое неметаллическое включение.

Возможности использования в литейном производстве доменных чушковых чугунов морально устаревшей традиционной номенклатуры (передельный-литейный) достаточно ограничены, так как свойства этих чугунов во многих случаях просто не позволяют получить готовые отливки с требуемой эксплуатационной надежностью. Например, литейные чугуны характеризуются наличием структурно неравномерного, весьма крупного графита, высоким содержанием растворенных газов и неметаллических включений, что и объясняет низкий уровень механических свойств готовых отливок. Передельный чугун, обеспечивая более высокий уровень механических свойств, характерен склонностью к отбелу, к получению метастабильных структур.

Чугуны доменной плавки каждого металлургического предприятия обладают свойствами, присущими только чугунам данного предприятия. Более того, каждая доменная печь выплавляет чугун с собственным набором свойств. Эти свойства не позволяют литейщикам производить адекватную замену чугунов различных производителей.

В значительной степени облегчить решение литейных проблем можно за счет организации выпуска для машиностроения конструкционных доменных чугунов (ДЧ) с заданными физико-механическими свойствами. Успех в решении этой задачи может быть достигнут только при взаимовыгодных условиях для металлургии и машиностроения.

Современное понимание природы металлургических расплавов позволяет выбрать меры воздействия на жидкий металл с целью глубокого изменения его свойств, не затрагивая доменный процесс как таковой. Следовательно, открывается возможность активно влиять на качественные характеристики. Целесообразность развития такого направления в технике определяется многими факторами, в том числе повышением требований к надежности готовых изделий, необходимостью снижения материальных и энергетических затрат на доводку чугуна по свойствам.

Существующая теория и практика внепечной обработки доменного чугуна перед разливкой в чушки позволила создать новый тип низкокремнистого доменного графитизированного чугуна литейного класса (ДГЛ) с новыми наследственными свойствами, которые сохраняются в отливке после переплава чугуна в литейном цехе. В этой связи необходимо принципиальное изменение философии производства доменного чугуна для литейного производства.

Внепечная обработка ДЧ рафинирующими, графитизирующими и микролегирующими реагентами способствует получению структуры модифицированного чугуна — перлитной или перлитоферритной металлической основы с мелким неориентированным графитом. При этом расход модификаторов крайне мал, так как в их задачу входит только активизация растворенного сверхравновесного углерода в чугуне, который в определенный период времени образует активные центры кристаллизации. Таким образом, во-первых, устраняется основной недостаток ДЧ — наличия в структуре неоднородного по размеру, форме и распределению графита в сочетании с неоднородной металлической основой. Во-вторых, наведенные структурные изменения, влекущие за собой повышение механических характеристик, снижение склонности к отбелу, улучшение жидкотекучести и др., сохраняются после переплава чугуна. Чугун приобретает новые устойчивые наследственные признаки. Этим методом можно придавать те наследственные свойства, которые нужны заказчику под производство конкретного вида литья.

Вариантом повышения заинтересованности металлургических предприятий является переход на выплавку передельных чугунов взамен литейных с последующей внепечной обработкой. Восстановление оксидов кремния в доменной печи при выплавке литейного чугуна протекает при температурах, превышающих 1700°K. На практике это достигается увеличением расхода кокса, что при снижении рудной нагрузки приводит к уменьшению степени использования восстановительной способности газов в печи, снижению производительности и ухудшению качества чугуна при росте содержания серы в нем.

В этом отношении представляет интерес зависимость между общим содержанием кремния и количеством микропримесей в доменных чугунах. При получении чугуна с повышенным содержанием кремния интенсифицируется реакция взаимодействия металла со шлаком, с футеровкой печи, с газовой атмосферой, что способствует увеличению содержания микропримесей, в том числе азота, кислорода, водорода, оказывающих отрицательное влияние на характер кристаллизации чугуна в готовых отливках, на их эксплуатационную надежность. Следовательно, нужно стремиться к минимизации содержания кремния в доменных чугунах. Однако низкокремнистые (<1% Si) доменные чугуны склонны к метастабильной кристаллизации, что делает их малопригодными к использованию в виде металлошихты. Следовательно, литейному производству нужен доменный чугун с низким содержанием микропримесей, хорошими литейными свойствами, низкой склонностью к отбелу, с мелким неориентированным равномерным пластинчатым графитом и, что особенно важно, эти качества должны быть на уровне наследственных, т.е. они должны быть воспроизводимыми в готовых отливках. Получить подобные свойства возможно с помощью модифицирования, внепечной обработки.

Подтверждением правильности выдвинутого требования явились эксперименты, проведенные в промышленных условиях, в ходе которых было впервые доказано, что эффект модифицирования доменных заэвтектических чугунов сохраняется после их переплава.

С целью исследования влияния модифицирования на изменение наследственных структурных характеристик и физико-механических свойств были изучены чугуны ряда предприятий, на которых доменные чугуны были подвергнуты внепечной обработке введением порошковой проволоки с 75% ферросилицием из расчета 2 кг модификатора на тонну чугуна.

В данном случае использован принцип «позднего модифицирования», когда время от ввода модификатора до полного затвердевания чушкового чугуна после разливки не превышает 30 мин. по длительности сохранения модифицирующего эффекта. Именно в этом заключается принципиальное отличие от производства синтетического литейного чугуна смешиванием литейного и передельного чугунов или за счет ввода в чугун большого количества ферросилиция. В результате эффект модифицирования исчезал до разливки чугуна, и в итоге был получен обычный литейный синтетический чугун.

В упомянутом эксперименте модификатор вводился в чугун порошковой проволокой в ковш, установленный непосредственно на разливной машине, что давало возможность сразу после модифицирования приступить к разливке чугуна с тем чтобы максимально использовать во времени эффект модифицирования чугуна.

Особенностью микроструктуры передельного чугуна явилось наличие междендритного графита и изолированных включений свободного цементита. Литейный чугун как до, так и после переплава имеет крупный пластинчатый графит и феррито-перлитную металлическую основу. При переплаве исходного передельного чугуна различного происхождения склонность к образованию междендритного графита и включений свободного цементита сохраняется. Указанная особенность практически полностью устраняется в результате модифицирования, причем этот эффект сохраняется и при индукционном переплаве. При модифицировании возрастают прочностные характеристики. Максимальные показатели прочности получены в рафинированном чугуне до и после переплава. В литейном чугуне после переплава, подобно исходному, получена феррито-перлитная (П45) металлическая основа с крупным пластинчатым и гнездообразным неравномерным графитом. Чугун этих проб характеризуется самыми низкими в серии исследуемых чугунов механическими свойствами.

Установленная взаимосвязь свидетельствует о том, что требуемые свойства машиностроительного литья могут быть запрограммированы в металлургии при производстве чушкового доменного чугуна с использованием традиционного модифицирования кремнийсодержащими модификаторами.

Полученные результаты подтверждаются исследованиями влияния на параметры кристаллизации различных чугунов при вторичном переплаве, проведенными в лабораторных условиях с использованием метода дифференциальной калориметрии. Установлено, что модифицирование чугуна графитизаторами повышает теплоту кристаллизации эвтектических фаз чугуна, температуру кристаллизации первичных фаз и эвтектики и понижает склонность к переохлаждению и метастабильной кристаллизации.

Таким образом, было установлено, что модифицирование обеспечивает в чушковом чугуне графитизирующий и рафинирующий эффект, сохраняющийся при переплаве. То есть чугун приобретает новые устойчивые наследственные свойства, которые, в зависимости от вводимых в процессе модифицирования компонентов, могут иметь совершенно различные запрограммированные свойства, благодаря чему чугун превращается в конструкционный сплав. Для этой же цели созданы модификаторы нового поколения (МНП), основу которых составляют более 30 наименований элементов и соединений боридов, нитридов, силицидов, карбидов и т.д.

Исследования показали, что обработка расплава чугуна различными элементами, входящими в состав МНП, и их комбинациями с другими элементами и модификаторами открывает новые аспекты воздействия на структуру расплава чугуна через воздействие на процессы кристаллизации и свойства железоуглеродистых сплавов. В процессе модифицирования в расплаве образуются искусственные наносоединения на основе элементов МНП, которые активно изменяют характер кристаллизации железоуглеродистых расплавов [1]. Такой метод воздействия на структуру железоуглеродистых расплавов получил название наномодифицирование. Наномодификатор обладает широким спектром свойств. К особо важным качественным характеристикам наномодификаторов следует отнести весьма малый удельный расход (порядка 200 г/т расплава) и отсутствие при вводе в расплав пироэффекта. Модификаторы не чувствительны к содержанию серы в расплаве, обеспечивают эффект объемной кристаллизации, чем минимизируют объемную усадку, существенно удлиняют длительность действия эффекта модифицирования. Свойства, полученные доменными чугунами после наномодифицирования, фиксируются как наследственные. Видимо, с технологической и экономической точки зрения, большие объемы доменного чугуна целесообразно модифицировать сочетанием ферро- и наномодификатора.

На основе изучения возможности управления структурной наследственностью передельного ЧДП посредством графитизирующего модифицирования первичного расплава решена задача, обеспечивающая получение высококачественного чугуна вторичной плавки при полной замене в шихте вагранок и электрических печей литейных чугунов передельными графитизированными чугунами.

Графитизирующее инокулирование первичного низкокремнистого (менее 1%) расплава ЧДП малыми добавками ферросплавов с высоким содержанием кремния или МНП снижает склонность чугуна к метастабильной кристаллизации и улучшает технологические и служебные свойства чугуна в отливках после вторичного переплава. В доменном графитизированном чугуне литейного класса (ДГЛ) на 15-20% повышаются значения $\sigma_в$ и появляются пластические свойства. По сравнению с обычным передельным чугуном. После переплава свойства сохраняются. Использование графитизированного низкокремнистого ЧДП дает возможность расширить сортамент применения его в литейном производстве и полностью заменить литейные и передельные чугуны.

Наиболее важным результатом исследований явилось то, что было установлено сохранение эффекта инокулирования первичного расплава ЧДП при вторичном переплаве, которое заключается в изменении характера его кристаллизации в сторону образования стабильных фаз, в практическом воспроизводстве первичной структуры.

На основании проведенных исследований можно с достаточной степенью уверенности утверждать, что на наследственные свойства ЧДП можно активно влиять методом внепечной обработки различными реагентами и их сочетаниями в период между выпусками чугуна из доменной печи и разливкой в чушки. В этот предкристаллизационный период, когда межатомные связи только формируются и еще неустойчивы, можно, зная влияние каждого элемента, вводимого в расплав, или влияние сочетания элементов, формировать заданные наследственные свойства для производства литья различного класса.

Разработанные процессы позволяют осуществлять не только модифицирование, но также микролегирование и легирование с целью воздействия на характеристики доменных чугунов, т.е. перейти к производству конструкционных чугунов.

В основе управления структурой чугуна доменной плавки лежит графитизирующее модифицирование передельного чугуна, получение низкокремнистого графитизированного чугуна литейного класса (ДГЛ) в качестве шихтовой составляющей для литейного производства взамен литейного и передельного чугуна.

Принципиально новый подход к качеству и номенклатуре доменных чугунов позволяет решать ряд следующих, достаточно важных задач:

- обеспечить литейное производство высококачественными чушковыми конструкционными чугунами;
- доменному производству отказаться от производства литейного чугуна, т.е. перейти на выплавку монопродукта — передельного чугуна с последующим ковшевым модифицированием чугуна, что позволит снизить расход кокса и повысить производительность доменных печей. В этом случае выполняется одно из основных условий организации производства конструкционных чугунов — взаимовыгодность двух отраслей промышленности.

Чугуны типа ДГЛ прошли широкую апробацию в литейных цехах машиностроительных заводов, показав высокие технологические свойства и превратившись в конструкционный чугун — продукт с добавленной стоимостью, благодаря внедрению новейших технологий и материалов.

Список литературы

1. В.А. Курганов, А.В. Федько, Д.В. Парамонов, С.В. Милов, С.В. Руднев. Наномодификаторы для внепечной обработки расплавов — Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2016. № 5, с. 23–26.

А.А. Акбердин, А.С. Ким, Р.Б. Султангазиев,
ХМИ им. Ж. Абишева

MgO ИЛИ B_2O_3 В ДОМЕННЫХ ШЛАКАХ?

Для многих производств базовой является система $CaO–SiO_2–Al_2O_3$. На ней основано получение цементного клинкера, керамики, ферросилиция, шамотных, муллитовых огнеупоров и целого ряда других изделий. Иногда в эту систему вводят добавки, улучшающие технологический процесс и качество изделий. Наибольшее распространение в промышленности получил оксид магния (MgO). В этом случае четверная система $CaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO$ может дополнительно описать производство углеродистого и рафинированного феррохрома, доломитовых и форстеритовых огнеупоров, чугуна в доменных печах. Но эти и ряд других производств испытывают серьёзные затруднения при использовании расплавов этой системы из-за их повышенной тугоплавкости и вязкости. Оптимального состава доменные шлаки на диаграмме состояния $CaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO$ группируются вдоль ребра $CaO–SiO_2$ в ограниченной по своим размерам области мелилита. Но переработка магнезиальных руд на кислых шлаках переводит их в поле тугоплавкого форстерита ($2MgO·SiO_2$), глиноземистых — в поле магнезиальной шпинели ($MgO·Al_2O_3$), работа на основных шлаках — в поле двухкальциевого силиката ($2CaO·SiO_2$), вызывая затруднения в работе доменных печей. Даже оптимального состава мелилитовые шлаки из-за своей повышенной вязкости едва ли на 50% используют свои потенциальные возможности по обессериванию чугуна[1].

Применение эффективных для этих случаев CaF_2, Na_2O, NaCl не получило широкого распространения из-за их экологической опасности. В тоже время в ряде отраслей промышленности успешно используется менее экологически опасный борный ангидрид (B_2O_3), оказывающий положительное влияние на свойства печных расплавов.

В настоящей работе дан сравнительный анализ физических свойств расплавов системы $CaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO$ и $CaO–SiO_2–Al_2O_3–B_2O_3$. Для

удобства анализа с использованием известных методов[2,3] построили диаграммы фазового состава изучаемых систем в виде элементарных тетраэдров сосуществующих фаз (рисунок 1). (Далее для краткости ввели обозначения C–CaO, S–SiO_2, C_2S–2CaO· SiO_2 и т. д.)

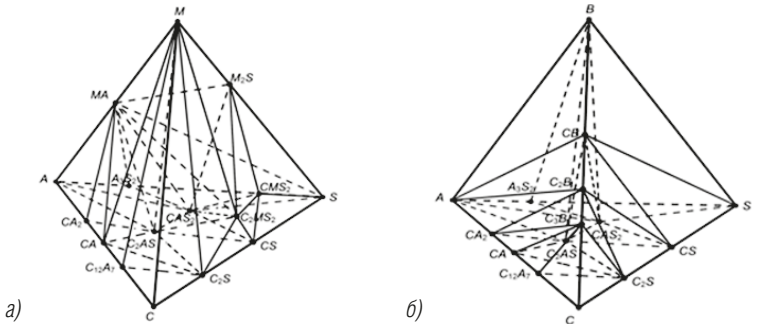


Рис. 1. Диаграммы фазового состава магнезиальной(а) и борсодержащей (б) системы

По ним можно иметь представление о количестве и видах образующихся фаз, установить сосуществование фаз друг с другом, траекторию движения шлака в фазовом пространстве и много другой информации. Но находить фазовый состав по ним путем обычных геометрических построений (правило отрезка) сложно, и поэтому с использованием разработанного авторами метода [4] создали их математические модели. Это позволило дать общую характеристику диаграмм с точки зрения их фазового строения. В таблицах 1 и 2 приведены характеристики стабильных в твердом и жидком состоянии фаз системы CaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO и CaO–SiO_2–Al_2O_3–B_2O_3. Можно видеть, что в магнезиальной системе самой низкотемпературной фазой (1392 °С) является диопсид (CMS_2), в то время как в борсодержащей — борный ангидрид (B), который плавится при 450°С.

Таблица 1. Характеристика фаз системы CaO–SiO_2 –Al_2O_3–MgO.

№	Фазы	Химический состав, масс.%				t пл., °С	Тетраэдры, куда входит фаза		W,%
		CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2		кол-во	объем	
1	C	100				2625	1	0,180	4,5
2	M		100			2800	7	0,574	14,2
3	A			100		2050	3	0,067	1,7
4	S				100	1713	5	0,270	6,8
5	C_2S	65,12			34,88	2130	5	0,334	8,3
6	CS	48,28			51,72	1544	4	0,061	1,5
7	CA	35,44		64,56		1605	4	0,156	3,8
8	CA_2	21,54		78,46		1750	2	0,022	0,6
9	$C_{12}A_7$	48,48		51,52		1455	2	0,225	5,6
10	C_2AS	40,87		37,23	21,90	1513	10	0,333	8,3
11	CAS_2	20,14		36,70	43,16	1553	11	0,398	9,8
12	CMS_2	25,93	18,52		55,55	1392	4	0,113	3,3
13	C_2MS_2	41,18	14,71		44,11	1454	9	0,386	9,6
14	M_2S		57,14		42,86	1890	5	0,345	8,6
15	MA		28,17	71,83		2135	10	0,479	12,0
16	A_3S_2			71,83	28,17	1910	2	0,057	1,4

Таблица 2. Характеристика фаз системы $CaO–SiO_2–Al_2O_3–B_2O_3$.

№	Фаза	Состав, мас%				t пл., °С	Тетраэдры, куда входит фаза		W,%
		CaO	SiO_2	Al_2O_3	B_2O_3		кол-во	объем	
1	C	100	0	0	0	2625	1	0,053	1,3
2	S	0	100	0	0	1713	3	0,407	10,2
3	A	0	0	100	0	2050	5	0,358	9,0
4	B	0	0	0	100	450	6	0,629	15,7
5	C_2S	65,12	34,88	0	0	2130	5	0,116	2,9
6	CS	48,28	51,72	0	0	1544	4	0,199	5,0
7	C_3B	70,59	0	0	29,41	1490	7	0,134	3,4
8	C_2B	61,54	0	0	38,46	1310	5	0,126	3,2
9	CB	44,44	0	0	55,56	1160	7	0,508	12,7
10	C_2AS	40,87	21,90	37,23	0	1513	12	0,470	11,7
11	CAS_2	20,14	43,16	36,70	0	1553	7	0,673	16,6
12	A_3S_2		28,17	71,83	0	1910	2	0,202	5,1
13	$C_{12}A_7$	48,48	0	51,52	0	1455	2	0,066	1,7
14	CA	35,44	0	64,56	0	1605	3	0,036	0,9
15	CA_2	21,54	0	78,46	0	1750	2	0,023	0,6

Если ориентироваться на температуру доменного шлака на выпуске (1500 °С), то в магнезиальной системе фаз с такой температурой плавления всего три — $C_{12}A_7$(1455 °С), C_2MS_2 (1454) и CMS_2 (1392 °С), а в борсодержащей — пять: C_3B (1490 °С), $C_{12}A_7$ (1455 °С), C_2B (1310 °С), CB (1160 °С) и B (450 °С). Поэтому борсодержащую систему можно в целом охарактеризовать как легкоплавкую.

Наличие математических моделей позволило дать характеристику диаграммам в части оценки объёмов полей кристаллизации отдельных фаз и вероятности существования (распространенности) их в фазовом пространстве (W) [2]. Такие сведения приведены в таблицах 1 и 2. По данным таблицы 2 видно, что, например, диалюминат кальция (CA_2) участвует в построении 2-х тетраэдров, а геленит (C_2AS) — в 12 и поэтому в фазовом пространстве они занимают разные по величине поля кристаллизации. Анализ показывает, что в системе $CaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO$ доминируют такие высокотемпературные фазы как периклаз (M, 2800 °С), манезиальная шпинель (MA, 2135 °С), анортит (CAS_2, 1553 °С), двухкальциевый силикат (C_2S, 2130 °С), форстерит (M_2S, 1890 °С), занимая более половины (53%) фазового пространства (таблица 1). В системе же $CaO–SiO_2–Al_2O_3–B_2O_3$ (таблица 2) примерно такой же объём (57%) приходится на анортит (CAS_2, 1553 °С), борный ангидрид (B, 450 °С), борат кальция (CB, 1160 °С), геленит (C_2AS, 1513 °С). Нетрудно также заметить, что замена MgO на B_2O_3 приводит практически к 3-х кратному снижению содержания опасного из-за инверсии двухкальциевого силиката (C_2S), приводящего к распаду шлаков. Это является следствием термодинамической предпочтительности образования боратов, нежели силикатов кальция.

Фазовый состав шлаков различных заводов вычислили подстановкой в модель (компьютерную программу) их химические составы (таблица 3). Анализ показывает, что доменные шлаки рассмотренных 12-ти заводов кристаллизуются в трёх близко расположенных друг к другу областях фазовой диаграммы системы $CaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO$. Шлаки Магнитогорского, Череповецкого, Орско-Халиловского, Запорожского, Криворожского заводов и Азовстали располагаются в фазовом четырёхвершиннике $CaO{\cdot}SiO_2–2CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2–2CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}SiO_2–2CaO{\cdot}SiO_2$, т.е. псевдоволластонит-окерманит-геленит-двухкальциевый силикат (рис. 2а). Окерманит и геленит образуют между собой твердый раствор, именуемый мелилитом.

Таблица 3. Фазовый состав доменных шлаков.

Завод	Состав шлака, масс.%									
	Химический				Фазовый					
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	CS	C_2MS_2	C_2AS	C_2S	CMS_2	M_2S
ММК	37,03	12,91	41,84	8,22	9,12	55,54	37,70	0,64		
КМК	38,15	14,53	36,12	11,20		33,74	39,06		24,223	2,96
Запсиб	37,85	17,27	31,15	13,73		6337	46,43		36,85	10,35
НТМК	38,63	12,96	42,11	6,30	23,65	37,42	34,84		4,10	
Чер.МК	39,55	8,21	41,78	10,46	6,05	70,68	22,07	1,20		
ОХМК	40,73	8,30	48,63	2,34	43,31	15,81	22,31	18,57		
Челяб.МК	41,81	13,92	35,32	8,95	13,37	5,34	37,42		43,87	
КАРМЕТ	39,19	11,80	42,0	7,01	21,96	42,26	31,72		4,06	
НЛМК	38,82	11,36	40,91	8,91	10,79	52,71	30,54		5,96	
Запорожст.	38,35	7,62	49,78	4,25	20,66	28,72	20,48	30,14		
Азовсталь	38,93	11,12	46,28	3,67	33,54	24,80	29,89	11,77		
Криворожст	39,32	7,84	50,05	2,79	32,29	18,85	21,08	27,78		

В шлаках перечисленных заводов доля мелилита составляет соответственно 93,24%; 92,75%; 38,12%; 49,20%; 39,93%; 54,69% и поэтому к преимущественно мелилитовым можно отнести только шлаки Магнитогорска, Череповца и Азовстали. Однако в этих шлаках доля окерманита в мелилите различна. В шлаках Череповецкого завода она составляет 76,2%, Магнитогорского — 59,6%, а Азовстали — 45,3%. В указанном порядке в шлаках нарастает количество тугоплавкого геленита. Шлаки Орско-Халиловского завода, Кривого Рога и Запорожья также располагаются в четырехвершиннике сосуществующих фаз $CaO{\cdot}SiO_2$–$2CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2$–$2CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}SiO_2$–$2CaO{\cdot}SiO_2$ (рис. 2а). Но все они тяготеют к полям кристаллизации псевдоволластонита и двухкальциевого силиката, а не мелилита. Их сумма в шлаках этих заводов составляет соответственно 61,88%; 60,07% и 50,80%. В шлаках ОХМК и Криворожстали доминирующей фазой является псевдоволластонит — 43,31 и 32,29% соответственно, а Запоржстали — двухкальциевый силикат (30,14%).

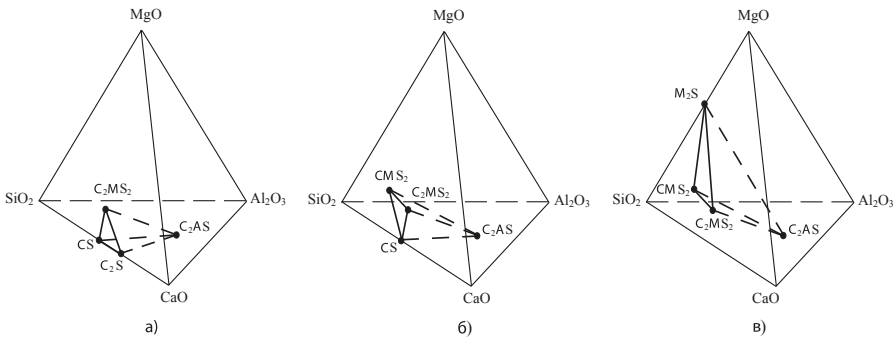


Рис. 2. Расположение доменных шлаков на фазовой диаграмме системыCaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO. (пояснения в тексте)

Все эти шлаки являются короткими, быстро кристаллизующими в узком интервале температур, и склонными к силикатному распаду из-за полиморфного превращения $2CaO{\cdot}SiO_2$ при охлаждении на шлаковом дворе, что вызывает серьезные экологические проблемы из-за пыления таких отвалов и распространения пылеватых частиц на многие сотни километров воздушными потоками.

Шлаки следующих четырех заводов — Нижне-Тагильского, Челябинского, Карагандинского (АрселорМиталл Темиртау) и Новолипецкого — располагаются в фазовом четырехвершиннике $CaO{\cdot}SiO_2$–

$2CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2$–$2CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}SiO_2$–$CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2$ (рис. 2б) и от предыдущих отличаются тем, что четвертой вершиной в них является не двухкальциевый силикат ($2CaO{\cdot}SiO_2$) с температурой плавления 2130 °С, а диопсид ($CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2$), плавящийся при 1392 °С. Правда только в шлаках Челябинского завода он является ведущей фазой (43,87%). В остальных шлаках его содержится в пределах 4,06–5,96%, и они также, как и предыдущие, относятся к типу мелилитовых. В порядке возрастания количества мелилита в доменных шлаках заводы располагаются в следующий ряд: НТМК (72,26%), АрселорМиталл Темиртау (73,98%) и НЛМК (83,25%).

Шлаки Кузнецкого и Западносибирского заводов кристаллизуются в четырехвершиннике $2CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2$–$2CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}SiO_2$–$CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2$–$2MgO{\cdot}SiO_2$ (рис. 2в) и от всех остальных отличаются наличием форстерита ($2MgO{\cdot}SiO_2$) с температурой плавления 1900 °С, появляющегося из-за переработки магнезиальных железных руд на шлаках пониженной основности. Но он не является здесь ведущей фазой.

Повышенная сумма окерманита и геленита (72,8 и 52,8% соответственно по заводам) позволяет отнести их к мелилитовым, но имеющая место гетерогенизация шлаков на холодных по нагреву выпусках является следствием присутствия в них даже умеренных количеств $2MgO{\cdot}SiO_2$.

Трудности в наведении шлаков оптимального состава на заводах преодолеваются использованием различных приёмов. Так, опробован даже такой радикальный способ как присадка плавикового шпата, когда за счет снижения вязкости шлака удалось получить от летки чистейшие по сере чугуны [5]. Но экологическая опасность CaF_2 пока сдерживает его применение в таком масштабном производстве как доменное. Можно полагать, что таких же результатов можно достичь при использовании B_2O_3. На рисунке 3 показано установленное нами экспериментально влияние MgO, CaF_2 и B_2O_3 на вязкость шлака одного и того же состава при 1500 °С.

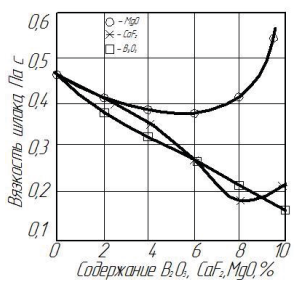


Рис. 3. Влияние B_2O_3, CaF_2 и MgO на вязкость шлака состава (масс.%): 40 CaO, 40 SiO_2 и 20 Al_2O_3 при 1500 °С

Можно видеть, что уже при 6% MgO вязкость шлака резко возрастает. Поддерживаемой температуры (1500 °С) оказывается недостаточно для гомогенизации расплава из-за появления высокотемпературной шпинели $MgO{\cdot}Al_2O_3$. Борный ангидрид (B_2O_3) по эффекту влияния на вязкость заметно превосходит MgO и не уступает экологически опасному CaF_2 (рис. 3). Аналогичный вывод можно сделать, сравнивая приведенные ниже диаграммы (рис. 4 и 5), полученные с применением электровибрационного вискозиметра и использованием метода планирования эксперимента на симплексе.

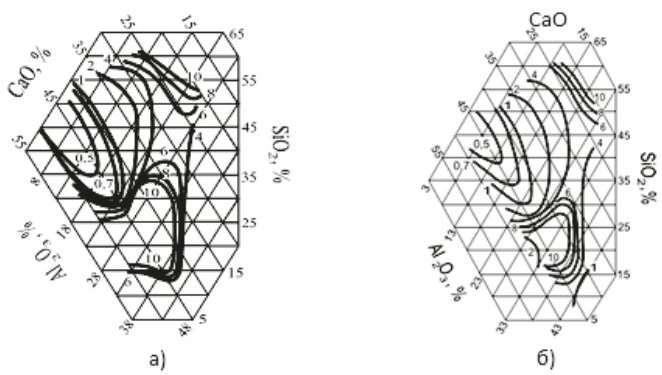


Рис. 4. Диаграммы вязкости шлаков с 2% MgO(а) и 2% B_2O_3(б) при 1450 °С

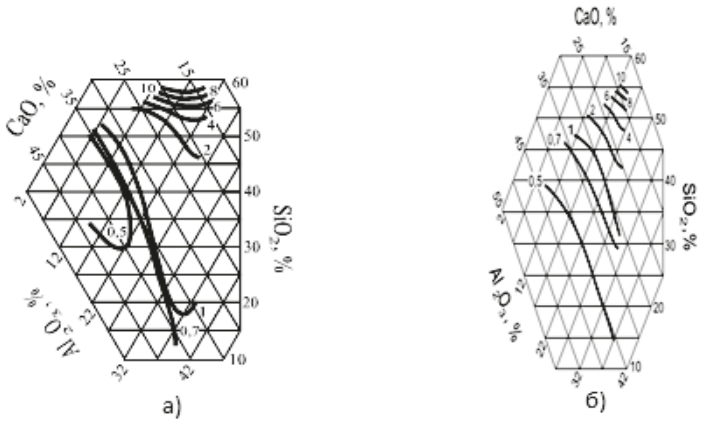


Рис. 5. Диаграммы вязкости шлаков с 8% MgO(а) и 8% B_2O_3 (б) при 1450 °С.

Уже при наличии в шлаках 2% B_2O_3 значительно сокращаются поля высоковязких шлаков области кристаллизации геленита, шлаки становятся более устойчивыми, что видно по частоте расположения изоком. При 8% B_2O_3 этот эффект усиливается. Но присаживать такое количество B_2O_3 в шлаки необходимости нет. Замена обычных 8% MgO на 2% B_2O_3 обеспечит высокую подвижность доменных шлаков. Этим достигается и повышение содержания Fe в шихте за счет вывода из него доломита.

Если говорить о влиянии B_2O_3 на вязкость шлаков конкретных заводов, то такие данные представлены на рисунке 6.

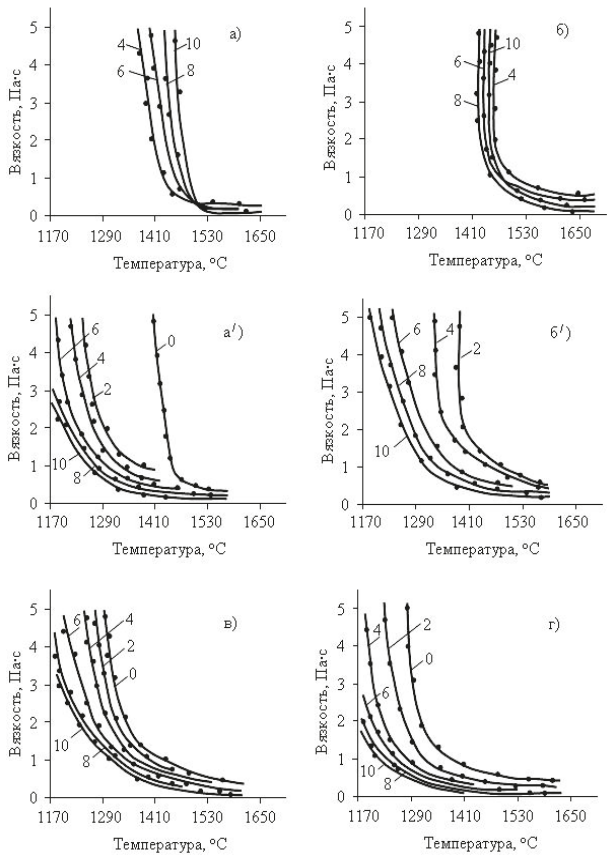


Рис. 6. Влияние MgO (а, б) и B_2O_3 (а', б', в, г) на вязкость шлаков Криворожстали(а, а'), плавки лисаковских обжигмагнитных концентратов (б, б'), Запсиба (в) и НТМК (г) (Цифры у кривых — содержание MgO и B_2O_3 в шлаках в массовых процентах)

Их анализ позволяет подтвердить данные диаграмм о том, что ввод в шлаки B_2O_3 снижает вязкость и температуру их кристаллизации. Особо сильно этот эффект проявляется на высокоосновном шлаке Криворожстали. Он тугоплавок. Его тугоплавкость (1466 °С) обусловлена повышенным содержанием двухкальциевого силиката. Она преодолевается присадкой B_2O_3 (рисунок 6, а'). По расплавлению же шлак достаточно подвижен, т.к. по преимуществу сложен из единичных тетраэдров $(SiO_4)4$- двухкальциевого силиката и сдвоенных — мелилита (геленит + окерманит).

Одним из недостатков высокоосновных шлаков является их распад из-за инверсии содержащегося в них двухкальциевого силиката, что затрудняет их дальнейшее использование и осложняет экологическую обстановку на предприятиях. В таких шлаках обнаруживается распавшаяся γ – форма $2CaO{\cdot}SiO_2$ (рис. 7, а). Присадка даже 0,3–0,5% B_2O_3 позволяет зафиксировать его высокотемпературные α'и β модификации (рис. 7, б, в) и получать после остывания шлак в кусковой форме, пригодный для использования в качестве щебня [6,7].

Иной является причина тугоплавкости глиноземистых шлаков проектируемой плавки лисаковского обжигмагнитного концентрата. Из-за наличия высокотемпературной шпинели (МА) и преобладания в мелилите тугоплавкого геленита (C_2AS) над окерманитом (C_2MS_2) температура кристаллизации магнезиальных шлаков выходит за рекомендуемые для производства низкокремнистого (1300 °С) и химически горячего передельного чугуна (1350 °С) пределы, находясь на обычном для выплавки литейного чугуна уровне. Преимущественно этим объясняются трудности производства передельного чугуна под шлаками с 27–30% глинозема как у нас, так и за рубежом. Решению этой проблемы может помочь B_2O_3 (рисунок 6, б и б'). Образующиеся шлаки, благодаря наличию низкотемпературных боратов кальция и трехкратному снижению содержания геленита, отвечают перечисленным выше требованиям как по вязкости, так и температуре кристаллизации [8].

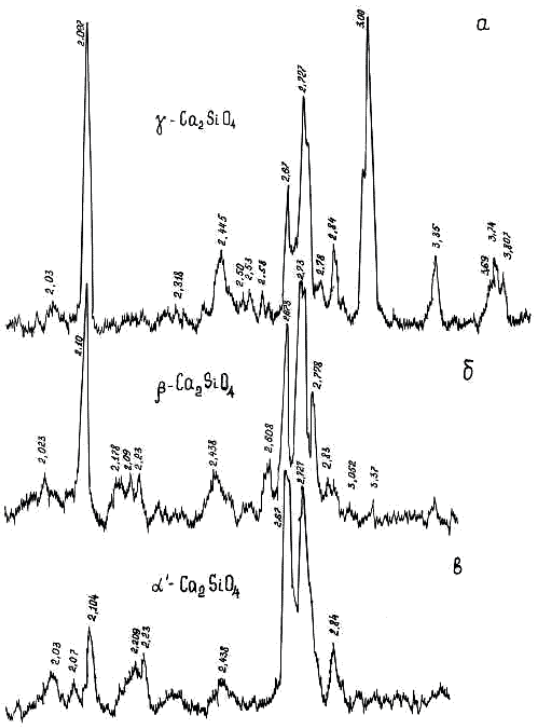


Рис. 7. Рентгенограммы распавшегося (а) и застабилизированного (б, в) боратовой рудой конечного доменного шлака комбината «Криворожсталь»

Хотя и в меньшей мере приведенный характер воздействия B_2O_3 проявляется на доменных шлаках АрселорМиталл Темиртау, Западно-Сибирского и Нижнетагильского металлургических комбинатов (рис. 6). Чугуны ванадиевой плавки НТМК для получения богатых по V_2O_5 конвертерных шлаков долж-

ны иметь минимальное количество примесей. Содержание кремния в них, например, ограничивается 0,2–0,3%. Как видно из рисунка 6, хорошая подвижность шлаков НТМК в области низких температур при присадке в них B_2O_3 должна способствовать ведению процесса на пониженном тепловом уровне с получением малокремнистых и низко титанистых чугунов. Но в случае переработки титаномагнетитов ключевую роль может сыграть способность бора заметно изменять межфазные явления. В присутствии микродоз бора в системе греналь-шлак работа адгезии снижается на 37% (с 688 до 436 МН/м), едва достигая 50% когезии шлака (таблица 4), следствием чего, вероятно, явилось снижение потерь ванадия со шлаками в 1,2–1,5 раза при опытах на доменных печах ванадиевого передела НТМК [9].

Таблица 4. Поверхностные свойства системы греналь-шлак.

№ опыта	Содержание		Угол контакта, градус	Межфазное натяжение, МН/м	Работа адгезии, МН/м	Когезия шлака, МН/м	Когезия гренали, МН/м	Температура, К
	B_2O_3 в шлаке, %	[B] в гренали,%						
1	0	0	29°06’	417	688	790	1420	1773
2	0,21	0,0015	69°00’	674	436	840	1380	1773
3	0,50	0,0039	71°00’	701	413	804	1423	1773
4	2,0	0,016	67°24’	685	456	874	1408	1773
5	4,00	0,035	69°50’	663	446	856	1362	1773

Надо подчеркнуть, что при доменной плавке катионы из таких разжижителей как MgO и CaF_2 в заметных количествах не восстанавливаются и в чугун не переходят, а бор по данным промышленных испытаний в чугуне обнаруживается, переходя далее в сталь и прокат. Способ одновременного использования в доменном шлаке MgO и B_2O_3 испытан путем переработки на ММК 450 тысяч тонн произведенных на ССГПО борсодержащих окатышей. Установлено заметное улучшение качества окатышей [10, 11], чугуна, стали и проката [12]. Высокий восстановительный потенциал доменной плавки и высокий окислительный потенциал сталеплавильного передела удерживают концентрацию бора в стали на уровне 0,001–0,003%, оптимальном для достижения высоких эксплуатационных характеристик для многих марок металла.

Обсуждаемый способ легирования стали через аглодоменный передел, а не присадкой в нее ферросплавов, не является чем-то новым или необычным. Доменщики ежедневно по поступающему заказу обеспечивают необходимое количество марганца, кремния, ванадия, титана и других элементов в стали изменением агломерационной шихты. Другими словами, аглодоменный комплекс далеко не исчерпал свой потенциал, имел и имеет вполне реальную возможность прямого влияния на качество конечной прокатной продукции обычной перешихтовкой. Важно, что и в случае с бором для этого не требуется капитальных вложений.

Конечно, говорить о полной ясности вопроса перехода на борсодержащие доменные шлаки преждевременно. Но теоретические разработки и длительный промышленный эксперимент говорят о перспективности этого направления и необходимости продолжения работ в этой области.

Список литературы

1. Куликов И.С. Десульфурация чугуна. — М.: Металлургиздат, 1962. — 306 с.
2. Бережной А.С. Многокомпонентные системы окислов. — Киев: Наукова Думка, 1970. 544 с.
3. Процюк А.Д., Карапетьянц М.Х. О термодинамическом исследовании процессов в многокомпонентных системах // Журн. прикл. Химии. — 1977, Т. 50, Вып. 1. — С. 169.
4. Акбердин. А.А. Балансовый метод расчета фазового состава многокомпонентных систем // Комплексное использование минерального сырья. — 1995, № 3. — С. 92–93.

5. Семик И.П., Варава В.И и др. Исследование вязкости и плавкости высокоосновных фторсодержащих шлаков // Металлургия чугуна: Сб. науч. тр. ДОННИИЧермет. — М.: Металлургия, 1969. — Вып. 8. — С. 155–162.
6. Акбердин А.А., Ким А.С., Есенжулов А.Б., Сарекенов К.З. Внедрение технологии стабилизации от силикатного распада основных металлургических шлаков // Теория и практика производства чугуна: Труды междун. научн.-практ. конф., посвящ. 70-летию КГГМК «Криворожсталь». — Кривой Рог, 2004. — С. 295–297.
7. Акбердин А.А., Огородников Г.А., Исхаков Ф.М., Зайко В.П., Сарекенов К.З., Ким А.С., Конуров У. Стабилизация от силикатного распада шлаков производства марганцевых ферросплавов на Челябинском электрометаллургическом комбинате // Известия Евразийского университета. — 2002, № 3. — С. 4–7.
8. Акбердин А.А. Перспективы доменной плавки лисаковского железорудного сырья // Тезисы докл. научно-практич. конф. «Комплексное использование минеральных ресурсов Казахстана». — Алматы, 1997. — С.108–109.
9. Акбердин А.А, Ким А.С. Резервы доменного процесса для производства высококачественного стального проката // Труды межд. научно-практ. конф. «Научно-техн. прогресс в металлургии», посв. 60-лет. г. Темиртау, 2005, 29–30 сент. — С.148–156.
10. Акбердин А.А., Долицкая О.Я., Малышева Т.Я, Чеснокова Г.В., Ким А.С. Особенности спекания железорудных окатышей с добавкой боратовой руды // Металлы, 1999, № 3, с. 23–26.
11. Акбердин А.А., Ким А.С., Сарекенов К.З. Разработка и промышленные испытания технологии производства легированных бором железорудных окатышей // Известия Евразийского университета. — 2000, № 1(1). — С. 69–78.
12. Акбердин А.А., Ким А.С. Доменная плавка на борсодержащих шлаках // Теория и практика производства чугуна: Труды междун. научн.-практ. конф., посвящ. 70-летию КГГМК «Криворожсталь». — Кривой Рог, 2004. — С. 146–149

И.Г. Товаровский, А.Е. Меркулов, ИЧМ НАН Украины

НОРМАТИВНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ НА РАСХОД КОКСА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

Под нормативной оценкой влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность доменной печи понимается определение величин изменений расхода кокса и производительности при изменении отдельных параметров плавки и их совокупности. Наличие такой оценки необходимо для выполнения оперативного анализа технологии, результативность которого зависит от полноты и качества используемой информации.

Использование в течение многих лет для этих целей известного перечня технологических факторов и установленного эмпирически влияния каждого из них на расход кокса и производительность показало неоднозначность во многих случаях этого влияния и необходимость создания системной методики. Разработка такой методики начата в ИЧМ по заданию Минчермета СССР в начале 80-х годов прошлого века.

После ряда обсуждений на предприятиях и в институтах отрасли методика была рассмотрена на Всесоюзных совещаниях доменщиков, после чего утверждена в качестве отраслевого директивного документа [1–4]. В ходе использования этого документа в последующие годы он непрерывно совершенствовался путем уточнения отдельных позиций на основе новых аналитических и экспериментальных исследований [5–7] и продолжает использоваться в настоящее время на предприятиях России, Украины и Казахстана. В обновленном виде отраслевой методический документ содержит уточнения в следующих позициях основной табличной формы (табл. 1): 6, 7, 13, 16, 18, 22, 26.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В ходе изучения влияния отдельных факторов на показатели доменной плавки выявлена его зависимость от комплекса сопутствующих условий. Поэтому оценка этого влияния не может быть всегда однозначной и в значительной мере зависит от поставленной задачи.

В случае изолированной оценки отдельного фактора необходимо учитывать весь комплекс связанных с ним условий. При сравнении различных периодов работы доменных печей, когда отдельные компоненты данного фактора уже учтены другими факторами, величина его влияния ограничивается основными компонентами во избежание «двойного учета».

При оперативном анализе изменений показателей плавки часто пользуются сводками нормированных коэффициентов подсчета расхода кокса и производительности печи, составленными по различным данным. Недостатком таких сводок является не взаимосвязанность коэффициентов, приводящая к погрешностям в их абсолютных значениях и повторному учету отдельных компонентов эффектов при пересчете по различным факторам.

Для правильного учета факторов при анализе показателей доменной плавки необходимо использовать специальные приемы, которые являются составной частью методики, обоснование и содержание которой излагается ниже.

Методика предназначена для использования при анализе изменений удельного расхода кокса и производительности доменных печей под влиянием изменений технологических параметров доменной плавки. Такой анализ выполняется при сопоставлении периодов работы доменных печей с различными значениями технологических параметров доменной плавки, определяющими величины удельного расхода кокса и производительности (по факторный анализ). В основе этого анализа лежат количественные соотношения между изменившимися параметрами (факторами) и удельным расходом кокса (производительностью доменных печей), которые определяются эмпирически либо аналитически.

Для получения надежных результатов на базе эмпирического материала требуется увязка его единой логически непротиворечивой основой. Такой основой являются результаты аналитического изучения процесса, которые обретают реальное содержание в контакте с эмпирическим материалом.

На основе установленных связей выполнили анализ имеющихся опытных данных, полученных в различных условиях, и выбрали наиболее надежные из них. Обобщенные данные практики использовали для корректировки величин, полученных аналитически. В табл. 1 даются сводка технологических факторов и величины их влияния на удельный расход кокса и производительность доменных печей, установленные изложенным способом, а также ссылки на основные источники, содержащие наиболее характерные результаты фактического влияния технологических факторов на удельный расход кокса и производительность доменных печей.

При использовании данных таблицы для сопоставления периодов работы доменных печей с различными параметрами и по факторного анализа удельного расхода кокса и производительности предполагается линейность и автономность влияния каждого фактора. В действительности влияние факторов на удельный расход кокса и производительность нелинейно и неаддитивно.

Характер его определяется общими принципами взаимосвязи параметров доменной плавки [2, 5, 6], кратко изложенными в конце настоящей статьи, исходя из которых оценка величины влияния каждого параметра на расход кокса и производительность должна производиться в зависимости от абсолютного значения величины параметра (чем оно выше, тем меньше величина влияния), сочетания с другими параметрами (одни усиливают, другие — ослабляют влияние), общего уровня совершенства процесса (чем он выше, тем меньше величина влияния всех параметров).

Поэтому диапазоны реальных значений ряда параметров разбития на интервалы, в пределах которых без большой погрешности связи можно считать линейными, а величины влияния некоторых факторов на расход кокса и производительность доменных печей даются в зависимости от среднего уровня других факторов.

Приведенные в табл. 1. факторы сгруппированы в три категории: шихтовые (п.п. 1–14, 26), газо-дутьевые (п.п. 15–20, 25) и организационные (п.п. 22–24).

Таблица 1. Влияние технологических факторов на удельный расход кокса и производительность доменной печи.

№ п/п	Факторы и единицы измерения	+ увеличение, – уменьшение		Источники с характерными результатами практики
		расход кокса,%	производительность,%	
1	Повышение содержания железа на каждый 1% (во всей шихте без кокса и CO_2 флюса)			
	в пределах до 50%	–1,4	+2,4	
	в пределах 50–55%	–1,2	+2,0	
	в пределах 55–60%	–1,0	+1,7	[9, 10]
	То же, снижение количества шлака на каждые 10 кг/т чугуна	–0,35	+0,6	
2	Повышение расхода чистых металлодобавок (100% Fe) на каждые 10 кг/т чугуна	–0,4	+0,6	[8, 11, 12]
3	Уменьшение расхода сырого известняка на каждые 10 кг/т чугуна	–0,5	+0,5	[8, с. 67–72]
	То же, доломитизированного	–0,4	+0,4	
4	Уменьшение содержания фракции 5–0 мм в железорудной шихте на каждый 1%	–0,5	+1,0	[13]
5	Уменьшение содержания золы в коксе на каждый 1%	–1,3	+1,3	[14]
6	Уменьшение содержания серы в коксе			[14]
	на каждую 0,1% при [S] = 0,05%	–0,18	+0,18	
	при [S] = 0,04%	–0,22	+0,22	
	при [S] = 0,03%	–0,27	+0,27	
	при [S] = 0,02%	–0,38	+0,38	
	при [S] = 0,01%	–0,71	+0,71	
7	Повышение прочности кокса,%/%:			
	7.1. по показателю M25	–0,6	+0,6	[14]
	7.2. по показателю CSR	–0,7	+0,7	[15–18]
8	Уменьшение истираемости кокса по показателю M10 на каждый 1% (%/%)	–2,8	+2,8	[14]
9	Уменьшение содержания в коксе фракции +80 мм на каждый 1% (%/%)	–0,2	+0,2	[14]
10	Уменьшение содержания кремния в чугуне на каждый 0,1%	–1,2	+1,2	[19]
11	Уменьшение содержания марганца в чугуне на каждый 0,1%	кг/т чуг.	%	
	при 30% Mn в выводимой руде	–1,17	+0,22	
	при 20% Mn в выводимой руде	–1,76	+0,35	
	при 15% Mn в выводимой руде	–2,27	+0,44	
12	Уменьшение содержания фосфора в чугуне на каждый 0,1%	–0,6	+0,6	
13	Повышение содержания серы в чугуне:			
	13.1. В случае прихода серы 10 кг/т:	(кг/т)	%	
	от 0,04 до 0,05%	–3,3	+0,6	
	от 0,03 до 0,04%	–5,5	+1,1	
	от 0,02 до 0,03%	–11	+2,0	
	от 0,01 до 0,02%	–33	+6,5	
	13.2. В случае прихода серы 4 кг/т:			
	от 0,04 до 0,05%	–1,3	+0,25	
	от 0,03 до 0,04%	–2,2	+0,4	
	от 0,02 до 0,03%	–4,4	+0,8	
	от 0,01 до 0,02%	–13,3	+2,5	

№ п/п	Факторы и единицы измерения	+ увеличение, – уменьшение		Источники с характерными результатами практики
		расход кокса,%	производи-тельность,%	
14	Повышение температуры дутья на каждые 10 °С в диапазонах:			
	800–900 °С	–0,50	+0,50	[20–22]
	900–1000 °С	–0,40	+0,40	
	а) при концентрации кислорода в дутье до 25%			[20–22]
	1000–1100 °С	–0,30	+0,30	
	1100–1200 °С	–0,28	+0,28	
	1200–1300 °С	–0,25	+0,25	
	1300–1400 °С	–0,22	+0,22	
	б) при концентрации кислорода в дутье 25–35%			[20–22]
	1000–1100 °С	–0,25	+0,25	
	1100–1200 °С	–0,20	+0,20	
	1200–1300 °С	–0,20	+0,20	
	1300–1400 °С	–0,18	+0,18	
	в) при концентрации кислорода в дутье 35–40%			[20–22]
	1000–1100 °С	–0,20	+0,20	
	1100–1200 °С	–0,18	+0,18	
	1200–1300 °С	–0,16	+0,16	
	1300–1400 °С	–0,14	+0,14	
15	Уменьшение влажности дутья на каждый 1 г/м^3 при расходе дутья:			
	1500–1600 м^3/т	–0,20	+0,14	
	1000–1100 м^3/т	–0,15	+0,06	
16	Обогащение дутья кислородом на каждый 1% (абс.) при концентрации:			[23–33]
	до 25%	+0,50	+2,0	
	25–30%	+0,80	+1,7	
	30–35%	+1,10	+1,4	
	35–40%	+1,40	+1,1	
17	Коэффициент замены кокса коксовым газом при расходе:			[23–33]
	до 200 м^3/т	0,45 кг/м^3		
	200–300 м^3/т	0,40 кг/м^3		
18	Коэффициент замены кокса природным газом при расходе:			[23–33]
	до 100 м^3/т	0,80 кг/м^3	–	
	100–150 м^3/т	0,60 кг/м^3	–	
	150–200 м^3/т	0,40 кг/м^3	–	
19	Коэффициент замены кокса мазутом	1,2 кг/кг	–	[23–33]
20	Коэффициент замены кокса измельченными углями:			[23–33]
	антрацитом и тощим с содержанием золы до 10%	0,9 кг/кг	–	
	то же, с содержанием золы 10–20%	0,8 кг/кг	–	
	газовым, с содержанием золы 10–20%	0,8 кг/кг	–	
21	Повышение давления газов под колошником на каждые 10 кПа в диапазоне 100–200 кПа избыточного давления	–0,20	+1,0	[34]
22	Уменьшение времени простоев на каждый 1%*	–0,50	+1,5	[35–37]

№ п/п	Факторы и единицы измерения	+ увеличение, – уменьшение		Источники с характерными результатами практики
		расход кокса,%	производительность,%	
23	Уменьшение времени тихого хода на каждый 1%	–0,50	+1,0	[35–37]
24	Уменьшение случаев задержки выпуска чугуна на каждый 1% при средней длительности задержки 0,5 интервала времени между смежными выпусками**	–0,05	+0,1	[38]
25	Увеличение степени форсирования плавки с повышением перепада давления газов на каждый 1% в пределах до граничного значения	–	+0,50	
	То же, сверх граничного значения	+0,2	+0,30	
26	Замещение кокса антрацитом, кг/кг	0,8–1,0	–	[39]

* В случае кратковременных простоев. При длительных остановках расход кокса изменяется незначительно, а производительность — на 1% на каждый 1% времени простоев.

** При другой средней длительности задержки выпусков указанные величины изменяются пропорционально.

Ниже приводятся особенности формирования и учета каждой категории факторов.

ШИХТОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Поскольку содержание железа в шихте зависит от основности, следует оперировать обобщенным показателем — содержанием железа в условно-самоплавкой шихте. Оно определяется как количество железа во всех компонентах (в том числе известняки, металлодобавки, шлаковые добавки и т.д.), кроме кокса, деленное на общий расход этих компонентов без CO2 карбонатов. Таким образом, расход сырого флюса входит в сумму компонентов шихты за вычетом содержащегося в нем CO_2.

Указанный показатель содержания железа позволит сравнить богатство шихт с разной основностью и исключить имеющую место неоднозначность существующего показателя содержания железа в шихте. Содержание железа в условно-самоплавкой шихте однозначно связано с выходом шлака на 1 т чугуна. Поэтому в ходе анализа можно оперировать только одной из указанных величин.

Повышению содержания железа на каждый 1% при одинаковой окисленности соответствует уменьшение количества шлака на величину: $\Delta Ш = 100 \times Fe_ч / (\%\ Fe)^2$, кг/т чуг.,

где: $Fe_ч$ — количество железа в чугуне, кг/т чугуна;% Fe — среднее содержание железа в условно-самоплавкой шихте,%.

При $Fe_ч$ = 940 кг/т и% Fe = 50% величина ΔШ = 37,6 кг/т

$Fe_ч$ = 940 кг/т и% Fe = 55% величина ΔШ = 31 кг/т

$Fe_ч$ = 940 кг/т и% Fe = 60% величина ΔШ = 26 кг/т.

При среднем содержании железа в шихте 50% изменение его на 1% приводит к изменению количества шлака в 1,4 раза большему, чем в случае среднего содержания железа 60%. По этой причине экономия кокса и прирост производительности на каждый дополнительный 1% железа в шихте, полученные в условиях Украины, в 1,4 раза выше, чем в условиях России. В значительной мере по этой же причине эффективность увеличения содержания железа за счет ввода в шихту окатышей в ряде случаев ниже, чем в случае повышения содержания железа в агломерате. Уменьшение выхода шлака на каждые 10 кг/т чугуна способствует экономии кокса 0,35% и приросту производительности 0,6% независимо от общего его количества и содержания железа в шихте.

Расход металлодобавки влияет на расход кокса через содержание железа в шихте (количество шлака) (п. 1) и расход тепла и углерода на прямое восстановление, изменяющийся под влиянием изменения степени металлизации, которая определяется как отношение количества металлического железа в шихте ко всему железу шихты. Поскольку учет содержания железа в шихте предусмотрен отдельной статьей (п.1), то расходом чистых металлодобавок (п. 2) учитывается только изменение степени металлизации шихты. При необходимости изолированной оценки влияния металлодобавок, когда измене-

ние количества шлака отдельно не учитывается, следует учесть его (3÷5 кг/т чугуна шлака на каждые 10 кг/т чугуна металлодобавок) в общей величине эффективности. Тогда экономия кокса от повышения расхода чистых металлодобавок (100% Fe) на каждые 10 кг/т чугуна составит 0,6%, а прирост производительности — 0,8%. Для загрязненных металлодобавок эффективность пропорциональна содержанию в них железа (кг/кг).

Степень офлюсования шихты влияет на расход кокса и производительность через содержание железа и расход сырого флюса. Первый фактор учитывается при подсчете изменения содержания железа в условно-самоплавкой шихте, второй следует учитывать отдельно (п. 3). Изложенный способ учета характеристики шихты исключает необходимость ввода такого параметра, как «доля агломерата и окатышей», так как последний влияет на расход кокса через выход шлака (содержание железа), расход флюса (п. 3) и содержание мелочи в шихте (п. 4).

Материальные характеристики кокса (п. 5, 6) и состав чугуна (п.п. 10÷13) влияют на расход кокса как непосредственно через тепловой баланс и баланс углерода, так и через изменения количества шлака и сырого флюса. Поскольку суммарное изменение количества шлака (содержания железа) и сырого флюса учитывается отдельно (п.п. 1, 3), величины влияния факторов на расход кокса и производительность по п.п. 5, 6, 10÷13 включают только эффект непосредственного влияния факторов на тепловой баланс и баланс углерода.

При необходимости оценить влияние каждого из рассматриваемых факторов в изолированном виде, когда суммарное изменение количества шлака и сырого флюса отдельно не учитывается, следует учесть это изменение в общей величине влияния каждого фактора на расход кокса и производительность (табл. 2; числитель — при отсутствии в шихте сырого флюса или постоянном его расходе, знаменатель — при изменении количества CaO в шихте изменением расхода сырого флюса).

Влияние прочности (п. 7) и истираемости (п. 8) кокса приводится с учетом имеющейся взаимной связи между показателями M25 и M10. Ранее прочность кокса характеризовали только показателем M25, который отражает свойства кокса в условиях шахты, теперь добавлен показатель послереакционной прочности CSR, отражающий свойства кокса в горне.

При необходимости изолированной оценки влияния каждого из этих показателей следует оценивать увеличение на каждый 1% показателя M25 экономией кокса и приростом производительности доменной печи 1,5%, а показателя M10 — значениями, приведенными в табл. 1.

Таблица 2. Изолированная оценка влияния факторов на удельный расход кокса и производительность печи.

Факторы и единицы измерения	+ увеличение, – уменьшение	
	расход кокса,%	производительность,%
Уменьшение содержания золы в коксе на 1%	–1,4/–1,8	+1,4/+1,8
Уменьшение содержания серы в коксе		
на каждый 0,1% при [S] = 0,05%	–0,18/–0,57	+0,18/+0,57
при [S] = 0,04%	–0,22/–0,70	+0,22/+0,70
при [S] = 0,03%	–0,27/–0,92	+0,27/+0,92
при [S] = 0,02%	–0,38/–1,36	+0,38/+1,36
при [S] = 0,01%	–0,71/–2,66	+0,71/+2,66
Уменьшение содержания кремния в чугуне на 0,1%	–1,2/–1,0	+1,2/+1,0
Уменьшение содержания марганца в чугуне на 0,1%	кг/т чуг.	%
при 30% Mn в выводимой Mn–руде	–1,17/–1,66	+0,22/+0,33
при 20% Mn в выводимой Mn–руде	–1,76/–2,89	+0,35/+0,42
при 15% Mn в выводимой Mn–руде	–2,27/–3,78	+0,44/+0,61

Факторы и единицы измерения	+ увеличение, – уменьшение	
	расход кокса,%	производительность,%
Повышение содержания серы в чугуне:	кг/т чуг.	%
в случае прихода серы с шихтой 10 кг/т		
от 0,04 до 0,05%	–3,3/–13,0	+0,6/+2,4
от 0,03 до 0,04%	–5,5/–21,7	+1,1/+4,3
от 0,02 до 0,03%	–11/–43,3	+2,0/+7,19
от 0,01 до 0,02%	–33/–130,0	+6,5/+25,6
в случае прихода серы с шихтой 4 кг/т		
от 0,04 до 0,05%	–1,3/–5,1	+0,25/+0,99
от 0,03 до 0,04%	–2,2/–8,7	+0,4/+1,58
от 0,02 до 0,03%	–4,4/–17,4	+0,8/+3,15
от 0,01 до 0,02%	–13,3/–52,4	+2,5/+9,85

ДУТЬЕВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Влияние дутьевых параметров на удельный расход кокса и производительность печи характерно большой нелинейностью и зависимостью от многих условий. Поэтому коэффициенты пересчета даны по диапазонам значений параметров и в зависимости от значений других параметров.

В наибольшей мере это относится к температуре дутья, расходу природного газа и кислорода.

Влияние концентрации кислорода в дутье на расход кокса неоднозначно и зависит от исходных условий. При работе на холодном или слабонагретом атмосферном дутье добавка кислорода способствует небольшой экономии кокса. В условиях высоконагретого дутья с большой концентрацией кислорода и малым расходом углеводородов дополнительное обогащение дутья кислородом без добавления углеводородов приводит к перерасходу кокса. Второй из указанных режимов характерен для большинства современных доменных печей, использующих кислород при нагреве дутья до 1000–1300 °С. Некоторый перерасход кокса (п. 16) имеет место на этих печах, несмотря на снижение удельных теплопотерь при обогащении дутья кислородом (без добавки природного газа) при практически неизменной степени прямого восстановления. В настоящей новой версии методического документа указанная величина перерасхода кокса (п. 16) показана более высокой (%/%), чем в руководящем документе 1987 года. Приведенные данные опираются на результаты специально выполненных исследований [5–7].

Коэффициенты замены (КЗ) кокса газообразными и жидкими холодными дутьевыми добавками зависят от всех параметров, определяющих характер температурного поля в печи (п.п.14–19). В общем случае расчетные значения КЗ тем больше, чем выше исходное значение теоретической температуры горения. Для значения этой температуры 2000 °С КЗ кокса природным газом составляет 0,9–1,0 кг/м^3 при небольших расходах, снижаясь до 0,7–0,3 кг/м^3 при расходах 150–200 м^3/т. Аналогично КЗ для коксового газа составляет 0,4–0,45 кг/м^3. КЗ кокса мазутом мало зависит от общего расхода и составляет 1,4 кг/кг. КЗ кокса измельченным углем определяется, главным образом, его составом и равен для антрацита 1,0 кг/кг, а для газовых и тощих углей 0,8–0,9 кг/кг.

Приведенные величины КЗ кокса могут быть получены в случае полного превращения углеводородов и твердого углерода у фурм. При существующих способах их ввода и распределения по фурмам часть углеводородов подвергается пиролизу с выделением сажи, а угольные частицы сгорают не полностью. Учитывая это, практические величины КЗ кокса приняты на 15–20% ниже предельных для природного газа, мазута и углей (п.п. 18, 19, 20). Для коксового газа указанное влияние незначительно (п.17). Повышение интенсивности плавки при форсированном ходе процесса приводит к увеличению удельного расхода кокса. Величина перерасхода кокса от повышения интенсивности плавки тем боль-

ше, чем ниже удельный расход кокса и меньше его прочность, больше мелких фракций в шихте и выше концентрация кислорода в дутье, а также меньше время пребывания шихтовых материалов в печи.

В случае повышения интенсивности за счет факторов, снижающих удельный расход кокса, например, отсев мелочи из шихты, совместное увеличение расхода кислорода и природного газа и др., перерасход кокса в явном виде не наблюдается, а уменьшается общая величина экономии. В этом случае влияние интенсивности плавки не требует отдельного учета, так как является компонентом суммарной величины изменения расхода кокса от воздействия основного фактора. Отдельный учет влияния интенсивности плавки требуется в случае изменений напряженности газодинамического режима, выражающихся в изменении перепада давления газов в печи (п. 25). Это происходит за счет изменений объема газов в единицу времени при постоянной газопроницаемости столба шихты, а также за счет изменений газопроницаемости столба шихты при одинаковом объеме газов в единицу времени. При этом увеличение перепада давления и соответствующее увеличение интенсивности плавки приводит к повышению производительности печи. Превышение некоторого граничного значения перепада давления приводит к возрастанию расхода кокса и соответствующему замедлению роста производительности печи. Граничные значения перепада давления для доменных печей разного объема ориентировочно составляют:

1000÷1242 м^3 — 130 кПа;
1300÷1800 м^3 — 140 кПа;
2000÷2300 м^3 — 150 кПа:
2700÷3200 м^3 — 160 кПа;
5000 м^3 — 180 кПа.

Для конкретных условий они должны быть уточнены по выражению:

$$\Delta P_{гр} = \Delta P_{гр}^{\circ} \times \frac{450}{к},$$ где $к$ — расход кокса, кг/т.

КОЛЕБАНИЯ СОСТАВА ШИХТЫ И ПАРАМЕТРОВ ПЛАВКИ

Приведенные в табл. 3 данные предназначены для изолированной оценки каждого из факторов, когда суммарное изменение количества шлака, содержания кремния в чугуне и перепада давления газов в столбе шихты отдельно не учитывается. При оценке влияния комплекса параметров (табл. 1), когда влияние изменения количества шлака (содержания железа в шихте), содержания кремния в чугуне и перепада давления в печи учитывается суммарно (независимо от определяющих факторов), отдельный учет влияния колеблемости состава шихты и параметров плавки не требуется.

Таблица 3. Влияние колебаний параметров на расход кокса и производительность печи.

Снижение среднеквадратичного отклонения факторов	Экономия кокса,%	Прирост производительности,%
Влажности кокса на 0,1%	0,28	0,42
Погрешности дозирования шихты на 0,1%	0,28	0,42
Зольности кокса на 0,1	0,36	0,54
Содержания железа в шихте на 0,1%	0,20	0,29
Основности шихты на 0,01 ед.	0,13–0,19	0,22–0,33*
Температуры дутья на 10°С	0,08	0,13
Влажности дутья на 0,1%	0,45	0,67
Расхода природного газа на 1 м3/т чугуна	0,42	0,63
Концентрации кислорода в дутье на 0,1%	–	0,22

*Меньшие значения при выходе шлака 300–350 кг/т чугуна, большие — при 450–500 кг/т чугуна.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ

К организационным факторам технологии относятся остановки и тихий ход доменных печей, ритмичность загрузки шихты и выпуска продуктов плавки, а также связанная с этими факторами стабильность хода процесса. Влияние этих факторов на удельный расход кокса и производительность печи зависит от характера переходных процессов, вызванных ими, и поэтому не всегда однозначно. Пока указанное влияние оценивается эмпирически, главным образом, на основе статистической обработки производственных данных (п.п. 22–24).

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ И ПРИНЦИПЫ

Влияние большинства рассмотренных выше факторов достаточно изучено и в значительной мере поддается количественному анализу в рамках единой логической схемы доменной плавки. Влияние некоторых из них, изученных недостаточно, пока приходится рассматривать изолированно, на основе обобщения эмпирических данных. К ним относятся механические и физико-химические свойства сырья и кокса, газораспределение в печи, особенности и динамика изменения элементов профиля печи (и соответственно теплопотерь), процессы в горне, миграция щелочей и сажи.

Указанные факторы, оказывая непосредственное влияние на удельный расход кокса и производительность печи, находятся в тесной связи с другими параметрами плавки и могут изменять характер влияния этих параметров на показатели процессов. Для достоверной их оценки требуется дальнейшее изучение и математическое описание процессов. На данном этапе используются лишь некоторые эмпирические данные (п.п. 4, 7, 8, 22–24). Сделаны серьезные шаги в количественной оценке влияния физико-химических свойств сырья и кокса, газораспределения в печи и теплопотерь [6].

При оценке влияния различных факторов, особенно малоизученных, полезно руководствоваться общими принципами взаимосвязи параметров доменной плавки [2, 5, 6], исходя из которых оценка величины влияния каждого параметра на расход кокса и производительность должна производиться в зависимости от абсолютного значения величины параметра (чем оно выше, тем меньше величина влияния), сочетания с другими параметрами (одни усиливают, другие — ослабляют влияние), общего уровня совершенства процесса (чем он выше, тем меньше величина влияния всех параметров). Сущность в следующем.

ПРИНЦИП ЗАТУХАНИЯ: МАКСИМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ КАЖДОГО МЕРОПРИЯТИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ДОСТИГАЕТСЯ ПРИ УСЛОВИЯХ, ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ ТЕМ, К КОТОРЫМ ВЕДЕТ ДАННОЕ МЕРОПРИЯТИЕ.

По мере приближения к режиму, соответствующему полной реализации данного мероприятия, эффективность его на каждом шаге реализации снижается и в пределе может быть нулевой или отрицательной.

Поскольку каждый шаг в осуществлении отдельного мероприятия сдвигает условия протекания процессов в печи в сторону режимов, при которых дальнейшие шаги будут менее эффективными, сочетание данного мероприятия с другим, обеспечивающим смещение условий протекания процессов в противоположную сторону, повышает эффективность обоих мероприятий. На этом основан **ПРИНЦИП СОЧЕТАНИЯ:** НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНЫ СОЧЕТАНИЯ ТАКИХ МЕРОПРИЯТИЙ, КОТОРЫЕ ВОЗДЕЙСТВУЮТ НА ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЕЧИ В ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ.

Рассмотренные два принципа охватывают доменную плавку как простую совокупность явлений, но не учитывают ее единства как большой системы, в которой связи между элементами не менее весомы, чем сами элементы, а система включает свойства, не присущие отдельным ее элементам. По мере совершенствования такой системы ряд комплексных параметров приближаются к предельному состоянию независимо от влияющих факторов. Формально это выражается в уменьшении энтропии системы.

Системный подход позволяет сформулировать **ПРИНЦИП ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ:** ПО МЕРЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ И ПРИБЛИЖЕНИЯ К НЕКОТОРОМУ ПРЕДЕЛЬНОМУ РЕЖИМУ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВСЕЙ СОВОКУПНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЕЕ ДАЛЬНЕЙШЕМУ УЛУЧШЕНИЮ СНИЖАЕТСЯ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе обобщения закономерностей протекания процессов доменной плавки и установленных общих принципов её функционирования дается нормативная оценка влияния технологических параметров на расход кокса и производительность доменной печи. Указанная нормативная оценка является методической основой для выполнения оперативного анализа технологии.

Разработанный методический инструмент «Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность доменной печи» является развитием ранее разработанного и используемого в металлургии России, Украины и Казахстана руководящего отраслевого документа «Доменные печи. Нормативы расхода кокса», Москва–Днепропетровск, 1987 г.

Новый документ существенно дополнен и уточнен на основе результатов выполненных в истекшие годы аналитических и экспериментальных исследований, а также обобщения опыта работы доменных печей.

Список литературы

1. Товаровский И.Г. Изучение влияния технологических факторов на удельный расход кокса и производительность доменной печи в широком диапазоне условий с установлением научно обоснованных нормативов // Тезисы докладов на Всесоюзном научно-техническом совещании «Повышение технического уровня и совершенствование технологии доменного производства», Липецк, май 1982, «Черметинформация», 1982, с. 14–17 .
2. Товаровсккий И.Г., Хомич В.Н. Принципы оценки влияния технологических факторов на показатели доменной плавки // Сталь. — 1979. — № 12. — С. 895–898.
3. Товаровский И.Г. Влияние технологических факторов на удельный расход кокса и проиводительность доменной печи // Сб. трудов (отраслевой) »Экономия кокса в доменных печах», М., «Металлургия»,1986, с. 75–83.
4. Министерство черной металлургии СССР. Техническое управление. Институт черной металлургии. // ДОМЕННЫЕ ПЕЧИ. НОРМАТИВЫ РАСХОДА КОКСА. Руководящий документ. Москва — Днепропетровск. 1987 г. С. 1 — 14.
5. Товаровский И.Г. Доменная плавка. 2-е издание. // Днепропетровск «Пороги». — 2009. — 764 с.
6. Товаровский И.Г. Процессы доменной плавки. Монография. Том 1. Анализ состояния. — 595 с. Том 2. Проблемы и перспективы. — 406 с. // Издательский дом LAP LAMBERT Academic Publishing. — 2012. Язык русский.
7. Товаровский И.Г., Большаков В.И., Меркулов А.Е. Аналитическое исследование процессов доменной плавки. Монография. — Днепропетровск: «Экономика», 2011. — 206 с.
8. Рамм А.Н. Современный доменный процесс.– М.: Металлургия, 1980. — 304 с.
9. Опытная плавка с уменьшенным выходом шлака / Н.Н. Бабарыкин, А.Л. Галатонов, И.И. Сагайдак и др. // Сталь. — 1964. — № 12. — С. 1069–1079.
10. Освоение технологии производства и плавка агломерата из концентрата глубокого обогащения / З.И. Некрасов, В.Л. Покрышкин, А.Г. Ульянов и др. // Сталь. — 1970. — № 3. — С. 202–207.
11. Применение металлизованного сырья в доменных печах / Р.М. Жак, А.Н. Пыриков, Г.А. Зинягин и др. // Обзорная информация Черная металлургия. Сер. Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна . — М.: Черметинформация. — 1983. — Вып. 4. — 31 с.

12. В.И. Мойкин, Б.А. Боковиков, Н.М. Бабушкин. Теплотехнический анализ работы доменной печи на металлизованной шихте методом математического моделирования // Сталь. — 1978. — № 11. — С. 982–986.
13. Работа доменной печи с использованием освобожденного от мелочи высокоосновного агломерата / И.А. Прокофьев, И.Г. Товаровский, В.И. Бондаренко и др. // Сталь. — 1979. — № 5. — С. 332–333.
14. Журавлев Г.В., Попов Н.Н., Коростик П.О. Влияние качества кокса при выплавке чугуна // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 1980. — № 4. — С. 28–29.
15. Исследование влияния реакционной способности, прочности и истираемости кокса на показатели работы доменных печей / Листопадов В.С., Лялюк В.П., Шеремет В.А., Кекух А.В., Оторвин П.И., Кассим Д.А., Тараканов А.К. // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». — 2010. — №8. — С.14–21.
16. Тараканов А. К., Лялюк В. П., Кассим Д. А.Обоснование современных подходов к оценке качества доменного кокса // Сталь. — 2011. — № 7. — С. 20–22.
17. Влияние реакционной способности и «горячей» прочности кокса на технико-экономические показатели доменной плавки в условиях. ОАО «МК «Азовсталь» / А.А. Томаш, В.П. Тарасов, Р.В. Ковальчик [и др.] // Вісник Приазовського державного технічного університету. — 2007. — № 17. — С. 9–13.
18. Ухмылова Г.С. Оптимизация качества металлургического кокса // «Черметинформация», приложение к «Новостям черной металлургии за рубежом». — 2002. — № 3. — 11 с.
19. Влияние технологических параметров на показатели доменной плавки / Б.Н. Старшинов, Н.Т. Романенко, А.В. Гаврашенко и др. //Сталь.–1968.– №8. — С.677–679.
20. Шумахер Х. Опыт работы доменной печи на высокотемпературном дутье // Черные металлы. — 1966. — № 6. — С. 3–11.
21. Товаровский И.Г., Бояровская Г.П. Эффективность нагрева доменного дутья // Сталь. — 1977. — № 12. — С. 1068–1074.
22. Шокул А.А., Лозовой В.П., Шаркевич Л.П. Работа доменной печи с нагревом дутья до 1200–1380°С // Сталь. — 1983. — № 3. — С. 10–13.
23. Опытная плавка в доменной печи объемом 2000 м3 при обогащении дутья кислородом до 30% / З.И. Некрасов, П.Г. Нетребко, Ф.Н. Москалина и др. // Сталь. — 1971. — № 10. — С. 887–894.
24. Доменная плавка на комбинированном дутье, содержащем 30–32% кислорода / З.И. Некрасов, М.Т. Бузоверя, Ф.Н. Москалина, В.А. Шатлов // Сталь. –1978.– № 4. — С. 306–310.
25. Опытные плавки в доменной печи объемом 2000 м3 на дутье с концентрацией кислорода до 35% / З.И. Некрасов, С.В. Колпаков, А.Ф. Андреев и др. // Сталь. — 1973. — № 2. — С. 97–104.
26. Первый опыт работы доменной печи объемом 2000 м^3 НЛМЗ с обогащением дутья кислородом до 40% / З.И. Некрасов, Н.С. Антипов, Н.М. Можаренко и др. // Сталь. — 1981. — № 7. — С. 7–9.
27. Русаков П.Г., Шур А.Б. Некоторые вопросы применения кислорода в доменной плавке // Сталь. — 1968. — № 8. — С. 679–683.
28. Работа доменной печи Череповецкого завода на комбинированном дутье высоких параметров / Л.А. Бялый, Б.Л. Жураковский, А.Г. Михалевич и др. // Сталь. — 1978. — № 9. — С. 782–787.
29. Работа доменной печи с низкой степенью компенсации кислорода природным газом/ Л.А. Бялый, В.А. Улахович, Б.Л. Жураковский и др. // Сталь. — 1981. — № 11. — С. 31–35.
30. Доменная плавка с вдуванием коксового газа / В.Ф. Пашинский, И.Г. Товаровский, П.Е. Коваленко, Н.Г. Бойков. — Киев: Техника, 1991. — 104 с.
31. Эффективность частичной замены кокса пылеугольным топливом в условиях завода «Запорожсталь» / А.Г. Ульянов, Ю.А. Приходько, Ф.Н. Москалина и др. // Металлург. — 1983. — № 11. — С. 13–14.
32. Ярошевский С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. — М.: Металлургия. — 1988. — 176 с.
33. Доменная плавка на дутье, обогащенном кислородом до 30% с расходом мазута до 100 кг/т чугуна / В.Н. Вакулин, Н.Е. Дунаев, В.В. Емушинцев и др. // Сталь. — 1976. — № 7. — С. 585–591.

34. Каган И.С., Сабин-Гуз Л.А. Применение корреляционного метода для выявления эффективности повышенного давления газа на колошнике доменной печи // Металлургия и коксохимия (межвузовский сборник). — Киев: Техніка. — 1966. — № 1. — С. 115–120.
35. Организационные проблемы повышения эффективности доменного производства / А.И. Стрелец, Л.П. Макаров, Л.Л. Гелюх и др. — М.: Металлургия, 1986. — 216 с.
36. Повышение эффективности выплавки чугуна за счет сокращения текущихпростоев / А.И. Стрелец, А.А. Бачинин, А.М. Осипенко и др. // Металлург. — 1980. — № 11. — С. 13–14.
37. Об оценке влияния текущих простоев на производительность доменных печей / Ю.П. Волков, И.А. Розентретер, Н.Т. Романенко и др. // Сталь. — 1983. — № 1. — С. 8–10.
38. Остроухов М.Я., Шпарбер Л.Я. Справочник мастера-доменщика. — М.: Металлургия, 1977. — 304 с.
39. Антрацит и термоантрацит в шихте доменной плавки. / В.П. Лялюк, И.Г. Товаровский, Д.А. Демчук, и др. — Днепропетровск: Пороги, 2008. — 245 с.

Раздел III
ТЕХНОЛОГИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

А.Е. Лазуткин, ГК «МетПром»
КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЯ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ. ТЕНДЕНЦИИ И РАЗВИТИЕ 124

А.С. Нестеров, Ю.С. Семенов, В.В. Горупаха, ИЧМ НАН Украины
А.М. Кузнецов, А.Г. Коваленко, А.В. Зубенко, ЧАО «ЕнМЗ»
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЖИДКИХ ФАЗ ПРИ ВДУВАНИИ ПУТ В ПЕРЕМЕННЫХ ШИХТОВЫХ УСЛОВИЯХ 133

Е.С. Попов, А.В. Сущенко, Л.Е. Васильев, ООО «МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ»
М.А. Томаш, ЧАО «ММК им. Ильича»
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПУТ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 138

В. В. Филиппов, В. А. Михалёв, К. В. Миронов, А. А. Форшев, АО «ЕВРАЗ НТМК»
Б.С. Тлеугабулов, С.А. Загайнов, Уральский ФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина
РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ВАНАДИЕВОГО ЧУГУНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА 146

В.И. Набока, ПАО «Запорожсталь»
ВЛИЯНИЕ ФУТЕРОВКИ И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ШАХТЫ НА РАСХОД КОКСА И РЕСУРС РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ» ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА 153

А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, ИЧМ НАН Украины
ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В УКРАИНЕ 163

А.Д. Зражевский., В.Н. Захарченко, ОП «Укрметаллургпром»
ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВДУВАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ УКРАИНЫ 173

А.Е. Лазуткин, ГК «МетПром»

КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЯ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ. ТЕНДЕНЦИИ И РАЗВИТИЕ

ВСТУПЛЕНИЕ

За последние пять лет самым существенным событием в доменном производстве России стало внедрение промышленной технологии вдувания пылеугольного топлива и интенсификация производства. Характерно, что эти два процесса идут на одних и тех же предприятиях — НТМК и НЛМК, ЗСМК и проблемы, возникающие в конструктивном исполнении доменных печей и их функционировании одни и те же. Главным фактором является достижение уровня расхода кокса 300–320 кг на т чугуна, что определяет трудности функционирования печей и конструктивные изменения, которые следует принимать. Эти же проблемы, возникли и на Украине, где внедрение технологии вдувания пылеугольного топлива произошло практически повсеместно.

ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВДУВАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Актуальность внедрения технологии вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) в настоящее время не вызывает сомнения. Эффективность внедрения технологии складывается из двух факторов:

- экономия расхода кокса за счет увеличения количества вдуваемого топлива по отношению к природному газу;
- экономия за счет ценовой разницы природного газа и угля.

МЕТПРОМПРОЕКТ участвует в проектировании всех установок вдувания ПУТ на территории России. Объекты находятся на разной стадии:

- НЛМК, доменный цех № 1, объект пущен в 2013 г.
- НЛМК, доменный цех № 2, проектирование закончено, оборудование закуплено и поставлено, ведется строительство. Пуск намечен в 1917 г.
- НТМК, первая очередь запущена в 2013 г.
- ЗСМК, первая очередь запущена в 2014 г.

Все установки на территории России до настоящего времени возводятся на основе технологии и оборудования фирмы Paul Wurth и LOESHE.

Технические показатели установок вдувания ПУТ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные показатели установок вдувания ПУТ по проектам МПП.

	НЛМК ДЦ1	НЛМК ДЦ2	НТМК	ЗСМК
На какие доменные печи	№ 3,4,5	№ 6,7	№ 5, 6 первая очередь № 7 вторая очередь	№ 1,2,3
Расчетный уровень вдувания, кг/т чугуна	ДП3 – 140 ДП4 – 140 (160) ДП5 – 160	до 180	180	до 200
Расход кокса после внедрения технологии, кг/т чугуна	ДП3 – 410 ДП4 – 410 (370*) ДП5 – 370	ДП7 – 316 ДП6 – 316*	320	300
Количество мельниц (шт.) и их производительность (т/ч)	2 шт. по 55 т/час (макс.)	2 х 75 т/час	2 х 80 т/час	2 х 80 т/час
Запас угля в приемных бункерах, часов	2 х 600 м^3 8 часов	2 х 1400 м^3 15 часов	2 х 480 м^3 4,5 часа	2 х 480 м^3 4,5 часа
Запас в бункере готовой пыли, час	РДО5 – 6 РДО3,4 – 8	2 х 1200 8,5 часа	3 х 1000 м^3 8 часов	3 х 1000 м^3 8 часов
Расход азота, нм^3/час	7250	9570	14700/10260	15422
Количество сосудов в РДО	РДО5 – 3+2 РДО3,4 – 3	6	9	9
Гарантированная точность распределения по фурмам,%	5	5	5	5

Собственно отделения помола на всех заводах выполнены практически однотипными:

- установки с помолом в нейтральной атмосфере , с подачей азота в качестве нейтрального газа и транспортом в азотной атмосфере;
- вертикальные мельницы и генераторы газа фирмы LOESHE:
- газ от воздухонагревателей как сушильный агент не используется (для уменьшения капитальных затрат);
- регулирование только общего количества ПУТ на вдувание. Точность распределения по фурмам — 5%;
- статические распределители вне здания литейного двора;
- применение докритических сопел Лаваля и компенсационных трубопроводов для обеспечения равномерности вдувания.

Что касается подачи угля к пылеприготовительным отделениям (ППО), то здесь структура комплекса установок весьма различна,

В доменном цехе № 1 НЛМК для приема угля задействован открытый склад угля коксохимического цеха, который был реконструирован с учетом будущей потребности для вдувания угля. Отделение предварительного дробления и ППО расположено рядом с коксохимическим цехом и доменной печью № 5. В отделении предварительного дробления угля осуществляется помол до фракции — 60 мм. В

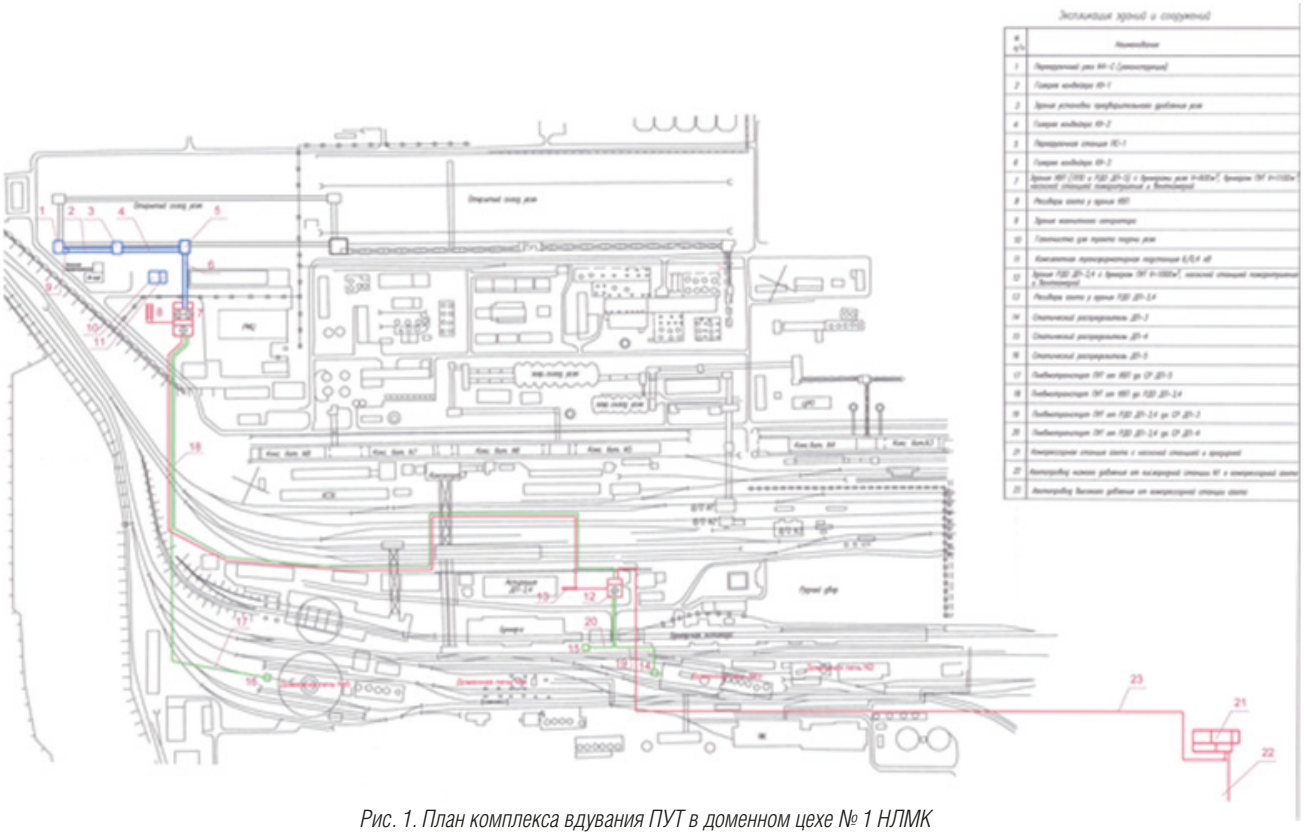


Рис. 1. План комплекса вдувания ПУТ в доменном цехе № 1 НЛМК

Рис. 2. Установка вдувания ПУТ в доменном цехе № 1 НЛМК

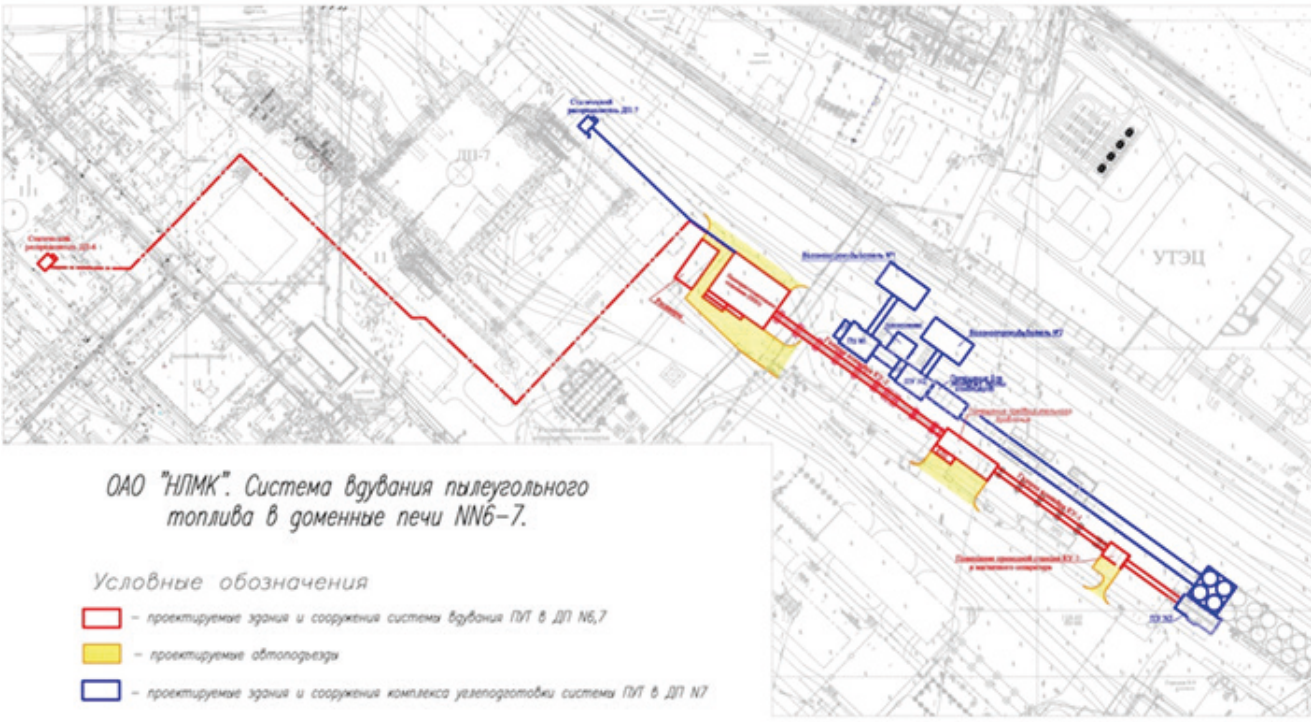


Рис. 3. Система вдувания пылеугольного топлива в доменном цехе № 2 НЛМК

ППО располагаются установка помола и сушки с двумя бункерами хранения сырого угля (V= 600 м^3), промежуточный бункер хранения ПУТ (V = 1100м^3), распределительно-дозировочное отделение (РДО) ДП5 с 3-мя сосудами для вдувания ПУТ в ДП №5 и два сосуда для пневмотранспорта помолотого угля к зданию РДО ДП № 3 и 4. В здании РДО ДП № 3 и 4 выполнен приемный бункер пыли (V = 1000 м^3) на запас 9 часов и собственно РДО ДП № 3 и 4.

Общий вид установки показан на рисунке 2.

В доменном цехе № 2 НЛМК (рис. 3) установка ППО выполнена в составе комплекса строительства ДП № 7. Доменная печь № 7 и установка ПУТ полностью работает на привозном сырье. После вагоноопрокидывателей материал наклонными конвейерами подается на силосный склад угля (запас 2,8 суток) и кокса. С силосного склада также наклонными конвейерами материал подается в ППО, где осуществляется помол угля. РДО ДП6 и 7 располагаются в здании ППО.

В доменном цехе НТМК выполнен новый гараж-размораживатель и вагоноопрокидыватель. Затем системой конвейеров уголь может подаваться на существующий открытый склад или на строящийся силосный закрытый склад (запас на 1,7 суток). На промежуточных перегрузках осуществляется грохочение и грубый помол угля. Отличительной особенностью установки вляется использования конвейера SICON для транспорта угля от силосного склада к ППО. Конвейер SICON позволяет осуществлять транспорт угля с перегибами и поворотами без организации перегрузочных станций. Это особенно важно в условиях плотной застройки, где имеются сложности с расположением перегрузочных станций и опор конвейеров. Инжиниринг и поставку конвейера SICON осуществлял ГК Метпром. План сооружений комплекса приведен на рис. 4, 5, 6.

В доменном цехе ЗСМК (рис. 7) наиболее компактная установка. Она состоит из гаража-размораживателя и вагоноопрокидывателя, конвейерного транспорта в помольное отделение, которое совмещено с силосным складом (запас 2,5 суток). Из силосного склада на ППО уголь подается вертикальным подъемником типа FLEXOWELL. Открытого склада угля нет, так как угольные поставщики находятся в непосредственно близости от завода.

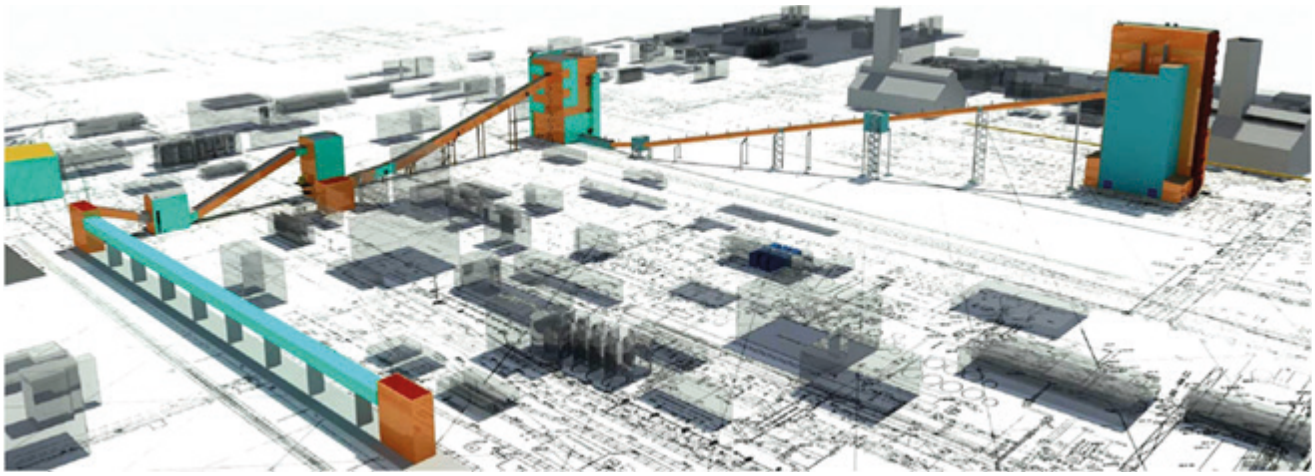


Рис. 4. План сооружений комплекса вдувания ПУТ на НТМК.

Рис. 5. План сооружений комплекса. Вид с ППО

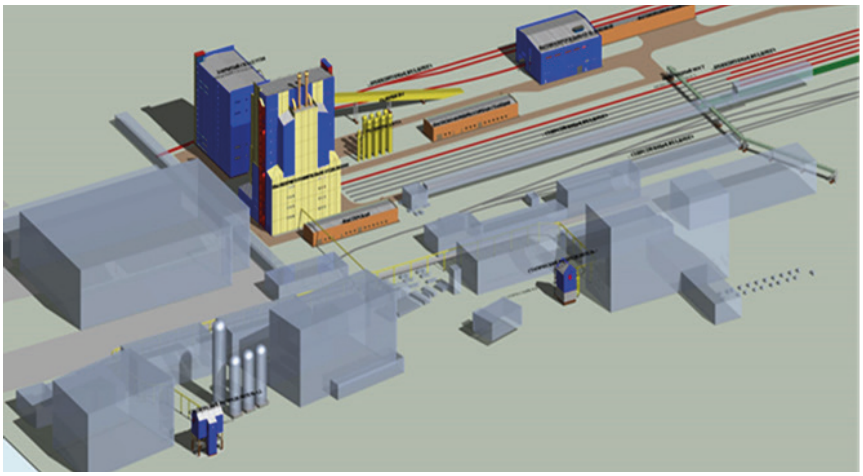


Рис. 6. Комплекс вдувания ПУТ ЗСМК

Рис. 7. Установка вдувания ПУТ НТМК. Пылеприготовительное отделение. Проектная компьютерная модель и реальная установка перед пуском

Таблица 2. Наиболее положительные результаты вдувания ПУТ получены на доменных печах НТМК. Июнь 2013 г.

Показатели	Доменная печь № 5	Доменная печь № 6
Объем доменной печи, м^3	2200	2200
Производительность, т/сутки	7386	7062
Удельная производительность, т/м^{3}сутки	3.33	3,25
Удельная производительность, т/м^2 горна сутки	97	96
Расход кокса, кг/т	318	310
Расход ПУТ, кг/т	132	130
Расход природного газа, м^3/т	72	72
Содержание кислорода в дутье,%	31,6	31,2
Температура дутья, °С	1161	1135
Давление под колошником, ати	2,18	2.17

Технология вдувания ПУТ на НТМК доказала свою эффективность при работе печей с рекордной удельной производительностью, достигающей 3,3 т/м^3 сутки.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ, РАБОТАЮЩИХ НА ТЕХНОЛОГИИ ВДУВАНИЯ ПУТ

На всех предприятиях, внедривших технологию вдувания ПУТ, возникли одни и те же проблемы, связанные с изменением газодинамики доменной печи. В основном это связано с уменьшением расхода кокса и изменением газового потока в зоне разрыхления над фурменными очагами горения. В целом газовый поток оказывается ближе к периферийным холодильникам и вызывает их горение.

Для преодоления этих трудностей возникает несколько принципиальных возможностей:

А) Регулирование процесса распределения шихты сверху.
Это осуществляется за счет установки бесконусных загрузочных устройств. На НТМК и НЛМК это устройства лоткового типа, на ЗСМК это устройства с роторным распределением материалов.

В) Регулирование дутьевого режима. Это вопрос отчасти технологический, связанный с диметром фурм и расходами дутья, и с другой стороны вопрос конструктивного исполнения. Более надежны для вдувания ПУТ сильфонные фурменные приборы с компенсаторами, с напольным оборудованием для смены фурм, которое передвигается по широкой фурменной площадке. Также благоприятно сказывается применение двухкамерных фурм или фурм с усиленным охлаждением рыльной части.

Б) Конструктивное исполнение заплечиков и низа шахты.

Увеличение тепловых потоков в этой зоне предполагает усиление системы охлаждения доменных печей в зоне заплечиков и низа шахты. Здесь появляется несколько возможностей:

- Конструктивное изменение конфигурации заплечиков с выносом холодильных плит от зоны фурменных очагов. Это может быть осуществлено на промежуточных капитальных ремонтах.
- Выполнение фурменного холодильника из меди.

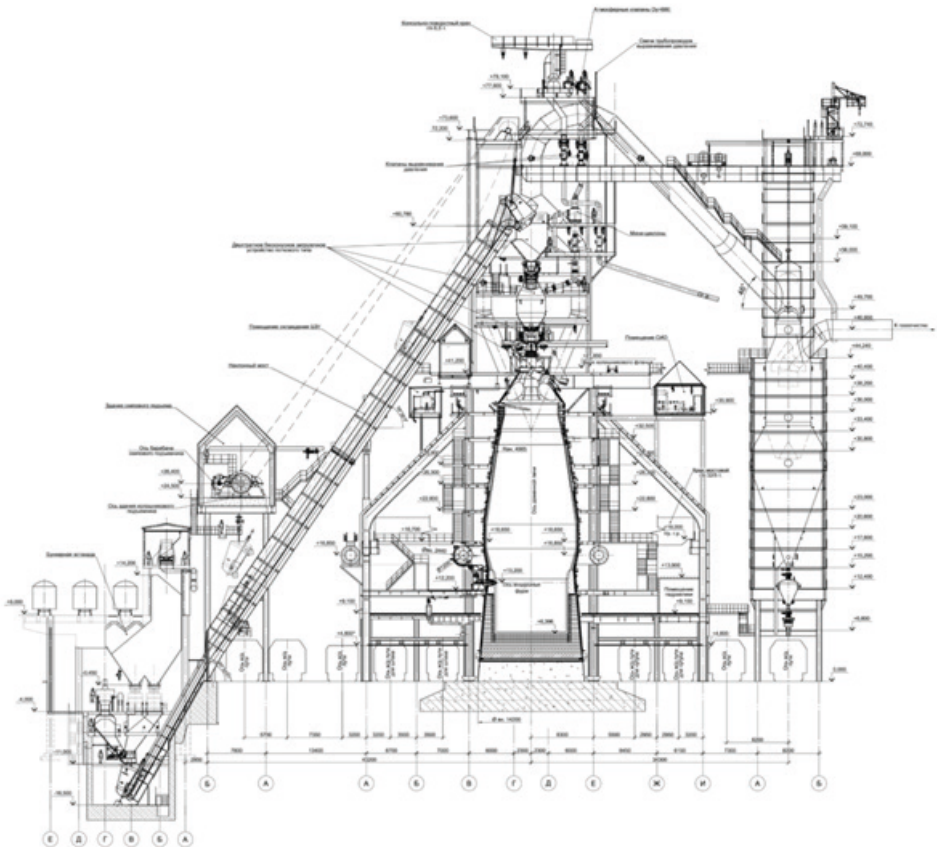


Рис. 8. Доменная печь № 7 НТМК. Разрез

- Использование медных холодильных плит (вертикальных или горизонтальных) в критических зонах доменной печи. На НТМК на доменной печи № 5 и 6 успешно используются вертикальные медные холодильные плиты.
- Использование усовершенствованных систем охлаждения. Увеличение тепловых потоков должно компенсироваться внедрение систем охлаждения с применением принудительного охлаждения химочищенной водой или испарительного охлаждения с принудительной циркуляцией химочищенной водой.

Наиболее перспективной смотрится система испарительного охлаждения с принудительной циркуляцией химочищенной водой, которая была применена в проекте Метпрома впервые в СНГ в 2005 г. для доменной печи № 5 НТМК.

Преимущества этой системы следующие:

- система способна адаптировать пиковые тепловые нагрузки;
- недостатки испарительной системы связанные с неравномерностью и недостаточностью циркуляции успешно преодолеваются за счет установки циркуляционных насосов;
- сама система гораздо более проста в связи с отсутствием контура охлаждения с установкой теплообменников химочищенной воды. Реальный расход технической воды уменьшается почти в два раза с соответствующим уменьшением капитальных затрат;
- система при правильном технологическом ведении позволяет практически работать на циркуляции горячей химочищенной воды с минимальным испарением.

В настоящее время осуществляется проектирование и строительство доменной печи № 7 на НТМК. Генеральное проектирование выполняет ГК Метпром. Доменная печь сразу проектируется на рекордные показатели по производительности.

Таблица 2. Основные показатели доменной печи.

Показатели	Показатель
Полезный объем доменной печи, (от летки до уровня загрузки),м^3	2200
Диаметр горна, м	9,8
Количество леток	2
Количество фурм	22
Давление под колошником, ати	2,5
Температура дутья, рабочая, °С	До 1300
Производительность, т/сутки	7100
Удельная производительность, т/м^3 сутки	3,2
Удельная производительность, т/м^2 горна сутки	94
Расход кокса, кг/т	320
Расход ПУТ, кг/т	До 180
Расход природного газа, м^3/т	До 135
Содержание кислорода в дутье,%	До 35
Выход шлака, кг/т	344

Основные виды доменной печи приведены на рисунке 8 и 9.

Доменная печь свободностоящая, безмараторной конструкции, с тонкостенной футеровкой в шахте. Охлаждение заплечиков и шахты доменной печи выполнено с использованием замкнутой принудительной системы испарительного охлаждения. Охлаждение горна доменной печи технической водой. Впервые в России будет использована система с кессонным наружным охлаждением горна.

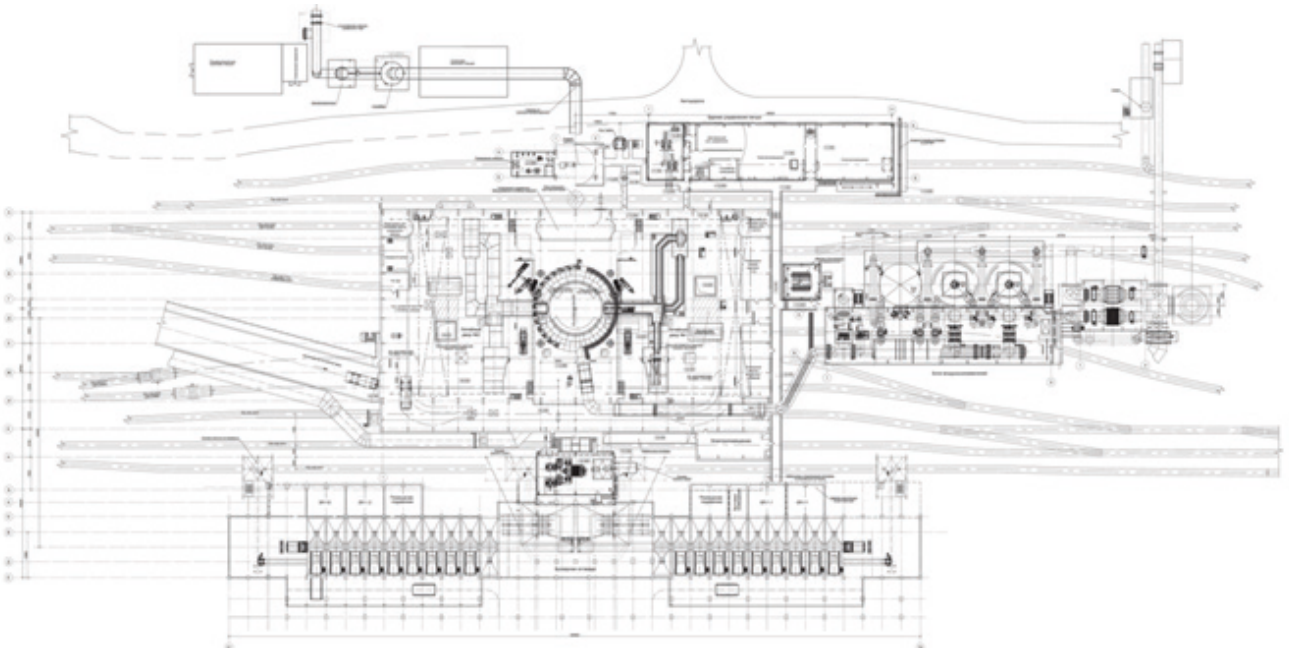


Рис. 9. Доменная печь № 7 НТМК. План

На доменной печи будет установлен комплект технологического оборудование фирмы Paul Wurth (загрузочное устройство, газоочистка, осевой циклон, оборудование литейного двора, фурменные приборы, установка аспирации).

Предусмотрено два литейных двора с двумя летками для выпуска чугуна.

Воздухонагреватели бесшахтной конструкции Калугина, с расчетной температурой дутья 1300 °С.

Для очистке доменного газа применен осевой циклон и малогабаритная газочистка в составе скруббера с тремя трубами Вентури с регулируемым зазором и каплеуловитель.

Бункерная эстакада реконструируется в связи с переходом от вагон-весов на конвейерную подачу шихты. Подача шихты на колошник скиповая.

Предусмотрена система аспирации литейного двора и шихтоподачи с использованием рукавных фильтров.

Следует отметить, что по своим эксплуатационным проектным показателям эта доменная печь превосходит общемировой уровень. Это же относится к капитальным затратам и срокам строительства. Можно отметить, что уровень инженерных решений, технологии и эксплуатации доменных печей в России остается на высоком уровне.

Метпром не только осуществляет генеральное проектирование, но и будет участвовать в строительно-монтажных работах. В настоящее время в нашем составе имеется строительно-монтажное подразделение со строительной техникой. Из крупных объектов, которые мы возводим в настоящее время — комплекс конвертерного цеха на Тулачермет и стан холодной прокатки в Белоруссии. В перспективе Метпром превращается в фирму, осуществляющую проектно-монтажные работы под ключ в металлургической отрасли.

А.С. Нестеров, Ю.С. Семенов, В.В. Горупаха, ИЧМ НАН Украины
А.М. Кузнецов, А.Г. Коваленко, А.В. Зубенко, ЧАО «ЕнМЗ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЖИДКИХ ФАЗ ПРИ ВДУВАНИИ ПУТ В ПЕРЕМЕННЫХ ШИХТОВЫХ УСЛОВИЯХ

Теоретические исследования, расчеты, промышленный опыт подавляющего большинства доменных цехов показывают, что одним из важнейших элементов технологии доменной плавки с применением ПУТ является обеспечение максимальной газификации пылеугольного топлива в пределах фурменной зоны. Несмотря на успехи в подготовке ПУТ к доменной плавке, улучшению узлов ввода, совершенствованию технологии сжигания пылеугольного топлива часть его проходит через стадию неполного сгорания в пределах фурменной зоны, ухудшая дренажную способность горна. Анализ литературных данных и собственных исследований по влиянию ПУТ на ход доменной плавки указывает, что содержание углерода в частично сгоревшем топливе может оставаться на уровне 5–15%, что совместно с золой пылеугольного топлива, составляет 15–20% от массы вдуваемой пыли. Основная часть несгоревшего пылеугольного топлива выносится под вязко-пластичную зону (по сечению печи) в район среза фурменного очага.

В период освоения ПУТ на Енакиевском металлургическом заводе сложились сложные шихтовые и организационные условия. Из-за организационных сложностей поставки шихтовых материалов происходили нерегулярно, обусловливая необходимость отрабатывать режимы работы доменных печей с переменной производительностью. При этом, в этот период, основность окатышей Северного ГОКа снизилась от 0,5 ед. до 0,15 ед., а их содержание в шихте изменялось в пределах от 35 до 80%, обусловливая необходимость изменять основность агломерата ЕМЗ в пределах от 1,6 до 2,2 ед. соответственно.

Переход на технологию доменной плавки с применением пылеугольного топлива отразился не только на расходе кокса, выходе конечного доменного шлака, но и к изменениям его физико-химических

свойств, в частности, увеличению его гетерогенности. Поэтому исследование процессов формирования первичных, промежуточных и конечных шлаковых расплавов из различных видов железорудного сырья при применении ПУТ в доменной печи является важным направлением, позволяющим на базе физико-химических особенностей различных материалов сформулировать требования к их распределению по сечению колошника доменной печи.

В Институте черной металлургии НАН Украины в лабораторных условиях проведена проплавка различных видов железорудного сырья на коксовой насадке с различной степенью замусоренности частицами ПУТ. Анализ показателей высокотемпературных свойств агломерата, окатышей, кусковых и марганцевых руд, а также их смесей выявил значительное различие состава и свойств первичных шлаковых и металлоуглеродистых расплавов в процессе восстановительно-тепловой обработки.

На рис. 1 графически представлено изменение температур начала фильтрации жидких фаз через коксовую насадку, массы первичного шлака и содержание в нем оксида железа в зависимости от основности железорудного сырья. Из рисунка 1 видно, что при повышении основности железорудного сырья температуры полной потери газопроницаемости слоя железорудного сырья и начала фильтрации жидких фаз через коксовую насадку растут, масса первичного шлакового расплава и содержание оксида железа в нем снижается. Вязкость первичных расплавов растет, остаток расплава в слое кокса увеличивается.

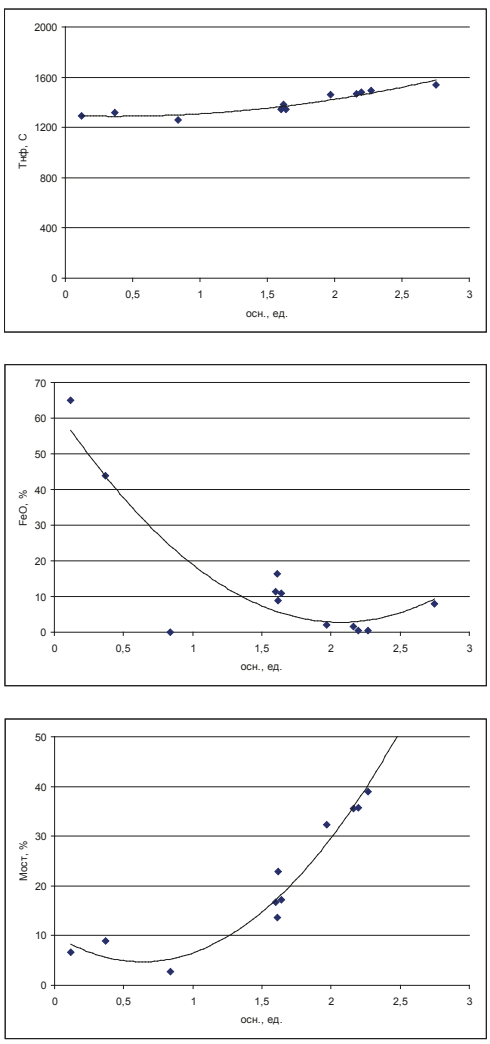


Рис. 1. Изменение высокотемпературных свойств железорудных материалов при изменении основности

Исследования показали, что при проплавке окатышей отделяется 25–35% первичного шлакового расплава с содержанием в нем 42–64% оксида железа, затем происходит совместное отделение металла и шлака и на коксовой насадке остается незначительное (6,0–8,0%) количество расплава, оставшегося в слое кокса (рис. 2, 3).

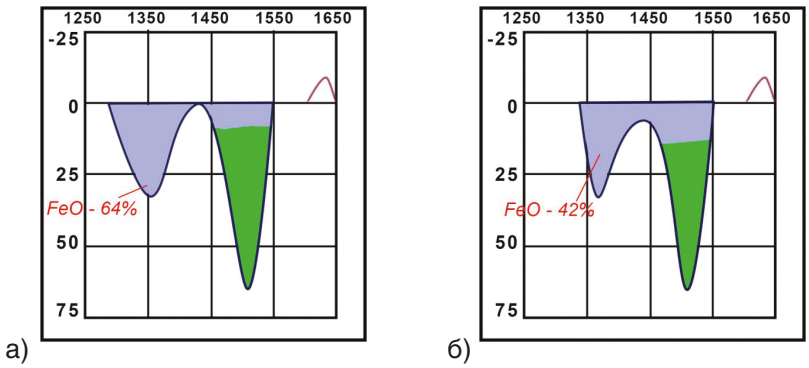


Рис. 2. Неофлюсованные и частично офлюсованные окатыши

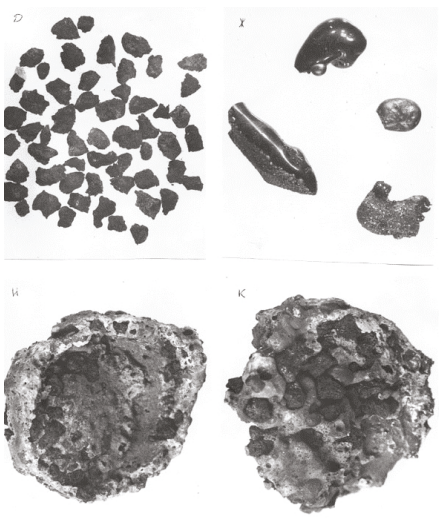


Рис. 3. Динамика фильтрации жидких продуктов плавки через коксовую насадку
(состояние коксовой насадки при проплавке частично-офлюсованных окатышей и при проплавке высокоосновного агломерата ($CaO/SiO_2 \geq 2,0$ ед.)

При проплавке смеси агломерата и окатышей близкой основности или агломерата основностью 1,0–1,2 ед. в начале через стадию первичного шлакообразования проходит 12–15% материала, затем происходит совместное отделение первичного шлака и металлоуглеродистого расплава. Остаток расплава в слое кокса повышается до 10–14,0%.

При повышении основности агломерата до 1,5–1,65 ед. формирование и фильтрация шлакового и металлоуглеродистого расплава через коксовую насадку проходят совместно. Остаток расплава в слое кокса может повышаться до 18–20%.

Расплав высокоосновного агломерата ($CaO/SiO_2 \geq 2,0$ ед.), профильтровавшийся через косовую насадку, практически полностью состоит из металлоуглеродистого расплава, шлаковая составляющая, несмотря на перегрев материала до 1600 °С, практически вся остается в слое кокса. В температурном диапазоне 1540–1600 °С вытекает около 25% от массы загружаемого материала, практически полностью состоящего из металлоуглеродистого расплава. Немагнитной составляющей в вытекшем расплаве было менее 2,0% (Рис. 4).

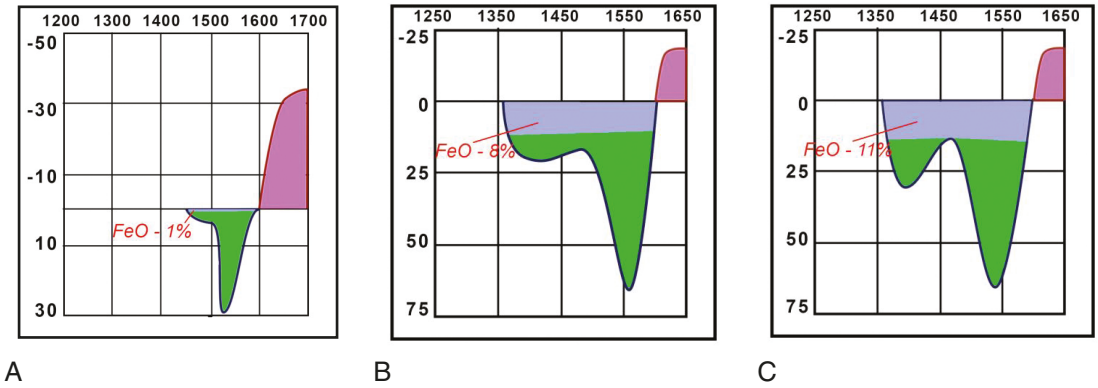


Рис. 4. Динамика фильтрации жидких продуктов плавки через коксовую насадку (А - высокоосновный агломерат (Cao/SiO_2 ~ 2,0, В – смесь: неофлюсованные окатыши + агломерат осн. 1,6 в соотношении 45:55; С – смесь неофлюсованные окатыши + агломерат осн. 1,6 + Мп концентрат в соотношении 44:54:2)

Попадание частиц не полностью сгоревшего топлива в первичные и промежуточные расплавы из высокоосновных материалов повышает гетерогенность шлакового расплава и сдвигает область температур фильтрации жидких фаз через коксовую насадку на 25–50°С, расширяя интервал вязкопластичного состояния материалов в доменной печи и увеличивает вероятность загромождения горна неплавкими массами. По нашим исследованиям вязкость первичных, промежуточных и конечных шлаковых расплавов при попадании от 4 до 7% озоленного ПУТ от массы расплава увеличивает его вязкость на 8–15% от базового уровня.

При регулировании распределения газового потока по радиусу печи при вдувании в горн ПУТ для достижения приемлемых (заданных или высоких) технико-экономических показателей плавки, в характерных для ЧАО «ЕМЗ» условиях работы, необходимо соблюдать следующие требования:

1. Исключить локализацию отдельных видов железорудного сырья по сечению колошника доменной печи;
2. Распределением компонентов железорудной части шихты по сечению колошника необходимо обеспечить повышенную концентрацию низкоосновного сырья в зоне локализации частиц ПУТ;
3. Обеспечить достаточную газопроницаемость периферийной зоны, не допуская излишней «подгрузки» ее железорудными материалами, которая может приводить к «верхним подвисаниям» и неровному сходу шихты (рудная нагрузка периферийной зоны должна превышать среднее значение, приблизительно в 1,2 раза).

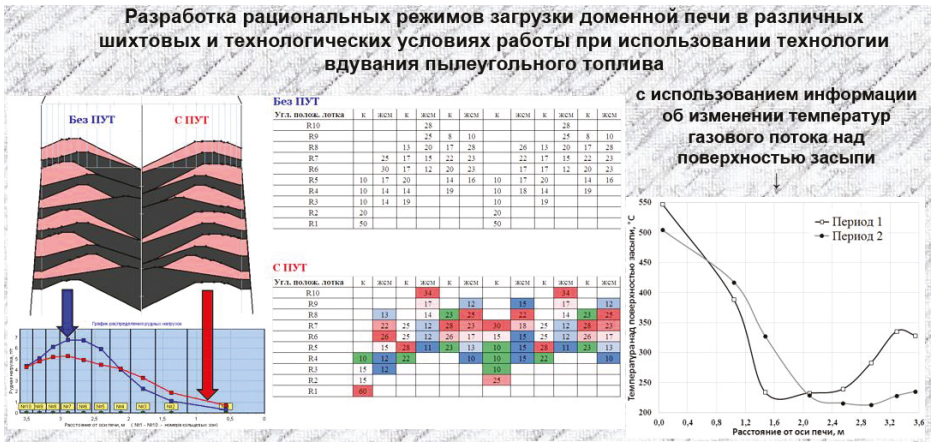


Рис. 5. Разработка рациональных режимов загрузки доменной печи

4. Обеспечить развитое центральное газораспределение (температура газов над поверхностью засыпи шихты в центре печи должна, в среднем, в 1,7 раза быть больше средней температуры) с одновременным развитым взаимным перетоком газов между периферией и центром (рудная нагрузка промежуточной зоны должна не более чем в 1,5 раза превышать среднее значение).
5. При развитом центральном газораспределении для повышения экономичности плавки необходимо обеспечить узкую осевую коксовую отдушину (температура газов над поверхностью шихты на расстоянии 1,0 м от оси печи должна быть меньше температуры осевой зоны, в среднем, в 1,8 раза).

На основании изложенных принципов и информации о распределении температур газового потока над поверхностью засыпи предложена для реализации программа загрузки, характерная для условий ЧАО «ЕМЗ».

Моделирование процессов поведения шихтовых материалов при восстановительно-тепловой обработки, формирования порций шихтовых материалов, распределение их на колошнике позволило сформировать заданные соотношения материалов по сечению колошника, обеспечивающие рациональное газораспределение в доменной печи.

Опытно-промышленное опробование скорректированного режима загрузки в период освоения ПУТ в переменных шихтовых условиях показало, что путем рационального распределения долей агломерата и окатышей по сечению колошника возможно понижать вязкость шлакового расплава на 30–40% от базового уровня, увеличивая при этом технологическую устойчивость доменной плавки.

ВЫВОДЫ

1. Работа доменных печей печи на многокомпонентном железорудном сырье при применении ПУТ обусловливает необходимость разработки технологических приемов и мер, направленных на исключение возможности локализации отдельных материалов по сечению доменной печи;
2. Лабораторные исследования, опытно-промышленные испытания показали, что в условиях работы доменной печи на бедном железорудном сырье (содержание Feобщ. ≤ 56,0%) с высокой долей окатышей и при применении ПУТ основность агломерата нецелесообразно повышать до величины превышающей 2,0 ед.
3. В условиях работы ДП с применением ПУТ, распределением компонентов железорудной части шихты по сечению колошника необходимо обеспечить повышенную концентрацию низкоосновного сырья в зоне локализации частиц ПУТ;
4. Ввод в состав шихтовых материалов марганецсодержащей добавки приводит к снижению температур плавления смеси железорудных материалов, понижает вязкость расплава, снижает количество расплава зависшего в коксовой насадке и повышает технологическую устойчивость доменного процесса;
5. При управлении газораспределением по радиусу печи при вдувании в горн ПУТ необходимо:
   – обеспечить достаточную газопроницаемость периферийной зоны, не допуская излишней «подгрузки» ее железорудными материалами;
   – обеспечить развитое центральное газораспределение с одновременным развитым взаимным перетоком газов между периферией и центром, при развитом центральном газораспределении для повышения экономичности плавки необходимо обеспечить узкую осевую коксовую отдушину.

Освоение технологии применения ПУТ в переменных шихтовых условиях ЧАО ЕМЗ позволили в 2016 г. довести расход пылеугольного топлива до 130 кг/т чугуна.

Е.С. Попов, А.В. Сущенко, Л.Е. Васильев,
ООО «МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ»
М.А. Томаш, ЧАО «ММК им. Ильича»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПУТ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Не смотря на развитие бескоксовой металлургии, классический вариант получения стали по схеме «доменная печь — кислородный конвертер» остается наиболее перспективным. Основные «конкуренты» доменной печи (ДП) являются не принципиально иными агрегатами, а, в определенной степени, ее частями. Как правило, предлагают заменить ДП либо ее верхней частью — шахтой (шахтные печи восстановления, реторты и др. при получении губчатого железа), либо нижней — горном (агрегаты жидкофазного восстановления с получением жидкого металла). Определённое распространение в современной металлургии получили процессы бескоксового получения стали и/или чугуна: «Мидрекс», «Корекс», «Ромелт» и др. Одним из критериев выбора оптимального способа металлургического производства являются затраты тепловой энергии на выплавку 1 т металла, которые должны быть минимизированы.

Сравнение затрат теплоты на производство 1 т металла (табл. 1) в доменной печи и в других восстановительных реакторах показывает, что энергоёмкость наиболее известных процессов восстановительной плавки существенно выше, чем доменного процесса. Исключение составляет твердофазное восстановление железа в шахтной печи «Мидрекс». Однако непосредственное сравнение этих процессов некорректно, так как продуктом технологии «Мидрекс» являются «холодные» металлизованные окатыши, максимальная температура которых в процессе восстановления не превышает 850 °С. Очевидно, что для получения жидкого чугуна с температурой 1400–1450 °С необходимы, как минимум, в два раза большие затраты теплоты. Использование твёрдых металлизованных продуктов потребует значительных затрат энергии при выплавке стали в электропечах, в то время как в конверторной

плавке главным образом используется физическая энергия расплавленного чугуна и химическая энергия растворённых в нём элементов, прежде всего — углерода. Для объективного сравнения энергоёмкости таких различных процессов необходимо составление тепловых балансов для систем «доменная печь — кислородный конвертор» и «шахтный восстановительный реактор — электросталеплавильная печь» [1].

Таблица 1. Расход тепловой энергии на получение 1 т металла в различных реакторах восстановления железа.

Процесс	Доменная печь	Мидрекс	Корекс	Ромелт
Расход, ГДж/т	14,7 – 18,8	11,9 – 12,9	22,5 — 23,3	28,6 – 34,4

Таким образом, можно полагать, что в обозримом будущем конкурента доменному способу производства чугуна в промышленных масштабах не предвидится. Это подтверждается и низкой долей металла, производимого в мире по альтернативным технологиям (~ 1%).

Основным направлением развития доменного производства является повышение его энергоэффективности, в первую очередь — снижение удельного расхода наиболее дорогостоящего и дефицитного ресурса — кокса. Расход кокса в ДП является одним из важнейших технико-экономических показателей работы металлургического комбината с полным циклом, во многом определяющим удельные затраты топливно-энергетических ресурсов на выпуск конечной металлопродукции, себестоимость и конкурентоспособность последней, а также уровень вредных выбросов предприятия в окружающую среду. Поэтому перед учеными и технологами-доменщиками на разных этапах эволюции производства одной из важных задач было уменьшение расхода кокса различными способами, в том числе и путем вдувания в ДП природного газа (ПГ) или пылеугольного топлива (ПУТ).

Первые опыты по вдуванию пылеугольного топлива в доменную печь были проведены в 1948 году на ДП объемом 427 м^3 завода им. Дзержинского под руководством профессора В.И. Логинова. В результате была установлена возможность и целесообразность вдувания ПУТ в ДП, достигнута скорость вдувания в горн печи до 20 т/час. Показано, что вдувание угольной пыли в количестве 5–6% от снижает общий расхода кокса на такую же величину. При вдувании ПУТ с содержанием золы 16–18% и серы 1,7–3% качество чугуна не ухудшилось. В 1967 г. в английском журнале была опубликована статья о применении ПУТ как будущего источника энергии для производства чугуна, где указано, что первыми установили возможность использования угольной пыли в доменной плавке ученые СССР. К началу 1966 г. с вдуванием ПУТ в мире работали 8 доменных печей — одна в СССР, четыре в США, две во Франции и одна в Англии [2].

В условиях лучших металлургических предприятий мира в Китае и Японии в настоящее время достигнут расход кокса 260–280 кг на тонну чугуна. Средний удельный расход кокса в странах Европы составляет 350–360 кг/т чугуна. Лучший современный показатель на передовых комбинатах Украины — 360–400 кг/т чугуна, а на других отечественных предприятиях он составляет 480–550 кг/т чугуна [3].

Вдувание пылеугольного топлива осуществляется на большинстве металлургических комбинатах Украины: «ММК им. Ильича», «МК Запорожсталь», «Енакиевский МЗ», «Криворожский МК», «Алчевский МК» и др. В 2016 году планируется запуск установки вдувания ПУТ на «МК Азовсталь».

Использование технологии вдувания пылеугольного топлива в горн позволило практически полностью отказаться от использования природного газа, а также существенно снизить расход кокса (рис.1). Природный газ подается в печь только при внештатных ситуациях, при которых невозможно подать достаточное количество ПУТ.

Для достижения максимальной эффективности технологии (обеспечения полного сгорания ПУТ в фурменных зонах, соответствующей компенсации значительного снижения доли кокса в шихте и др.), необходима реализация целого комплекса технических и технологических мероприятий [4]:

- повышение температуры дутья до 1100–1300 °С и содержания в нём кислорода до 25–33%;
- повышение прочности железорудной шихты и снижение прихода с ней мелочи (0–5 мм) до 1–5%;

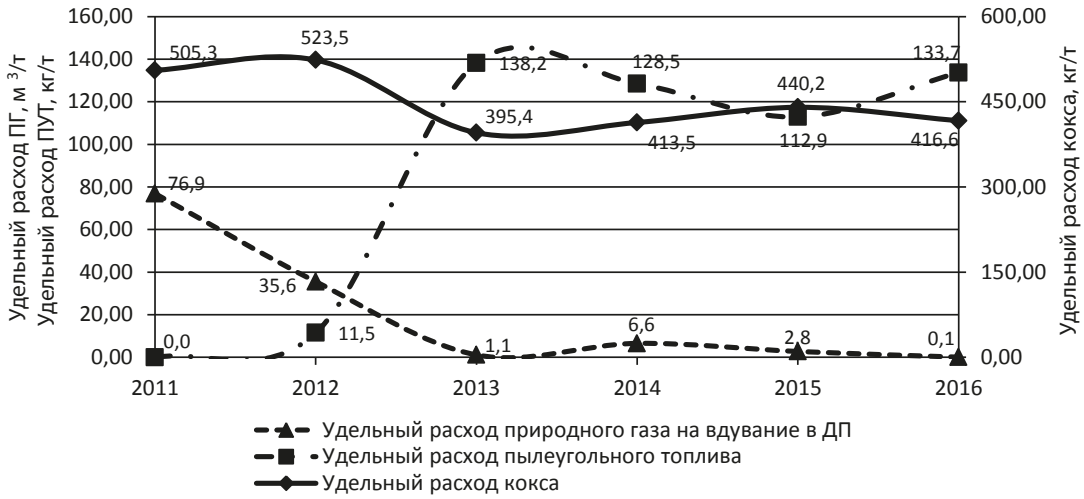


Рис. 1. Динамика удельных расходов ПГ, ПУТ и кокса на ММКИ за 2011–2016 г. (внедрение технологии вдувания ПУТ с 2012 г.)

- обогащение железорудной шихты и снижение уровня основности шлака (CaO/SiO_2) до 1–1,15 с целью оптимизации физических свойств шлаков н снижения его выхода до 200–300 кг/т чугуна;
- ограничение прихода с шихтой на 1 т чугуна серы до 2–4 кг и щелочей до 1,5–3 кг;
- повышение горячей прочности кокса (CSR) до 60–70% и др.

Ни в одном доменном цехе Украины в полном объёме данные мероприятия не реализованы, причем, меньше всего мировым стандартам отвечают качество железорудного сырья и кокса – определяющие компоненты доменной технологии.

Опыт показывает, что высокоэффективную технологию с расходом ПУТ 200–260 кг/т чугуна и более удается реализовать лишь на предприятиях, использующих кокс с показателями CRI 17–25% и CSR 65–74%, что подтверждено соответствующими требованиями к качеству кокса. Из рис. 2 следует, что расход ПУТ более 200 кг/т чугуна может быть достигнут при условии соответственного повышения показателя CRS до 68% и более [5].

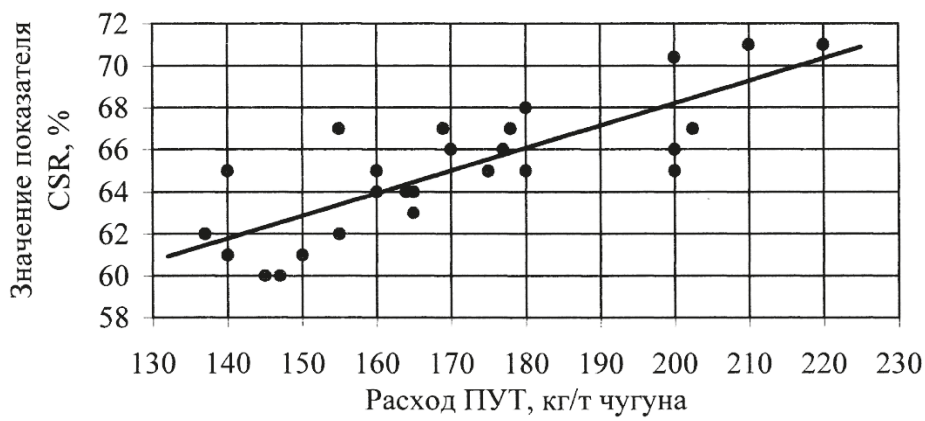
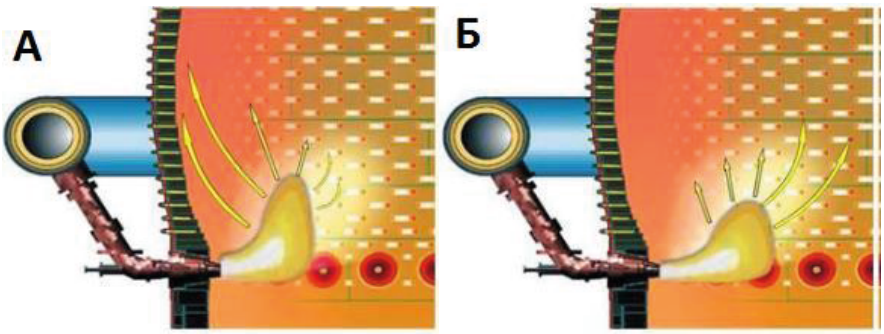


Рис. 2. Зависимость требуемой величины CSR кокса от удельного расхода ПУТ [5]

При высоких удельных расходах ПУТ (свыше 100–140 кг/т) доменщики столкнулись с проблемой усиления периферийного потока газов (рис. 3) и перегревом кладки. Было установлено, что этому способствовало смещение фокуса горения (максимума диоксида углерода) к торцу фурмы и уменьшение объема циркуляционной зоны. Причиной этого явилась замена «горячего» кокса «холодным» углем и,

как следствие, снижение теоретической температуры. Для ее сохранения дутье обогащают кислородом, что сопровождается уменьшением расхода и кинетической энергии дутья. При увеличении рудной нагрузки возрастает сопротивление шихты, что также приводит к снижению размеров зоны циркуляции. Наблюдается неполное сжигание вдуваемого твердого топлива, размягчение и ожижение зольного остатка угля в дутьевом потоке и фурменном очаге. Как следствие имеют место «пики» в динамике температур и теплосъемов охлаждающих элементов, неравномерный сход шихты, колебание эффективности использования CO, ухудшение дренажной способности горна и др.



А – Очаг горения при использовании ПУТ (развит периферийный ход)
Б – Очаг горения при использовании ПГ (развит центральный ход)

Рис. 3. Схема очага горения при использовании пылеугольного топлива и природного газа

Большинство доменных печей имеют типовые профили, разработанные для работы с природным газом, оборудованные испарительной системой охлаждения с чугунными вертикальными плитовыми холодильниками заплечиков и шахты, которые не являются эффективными в условиях работы с применением ПУТ. Для решения этой проблемы исследователи рекомендуют: совершенствование фурменных приборов, замену холодильников фурменной зоны, заплечиков, маратора и шахты на медные горизонтальные холодильники с углеродистой футеровкой, установку чугунных холодильников на неохлаждаемой части шахты печи, модернизацию защитных плит колошника, внедрение систем автоматизированного контроля разгара футеровки, тепловых нагрузок (тепловых потерь в системе охлаждения).

Благоприятным условием для увеличения расхода ПУТ является организация распределения материалов по схеме «с центральным ходом печи», которую осуществляют загрузкой более крупного кокса в центр колошника, а менее крупного — в периферийную и промежуточную зоны радиуса, послойно с железорудной частью. Это позволяет улучшить газопроницаемость шихты, обеспечить более равномерное распределение газов и теплоты по сечению и высоте доменной печи. Такой результат можно достичь, используя современные бесконусные загрузочные устройства.

Особое внимание следует уделять составу и свойствам углей, а также технологии их подготовки к сжиганию в горне. В углях содержится водорода больше, чем в коксе, но в несколько раз меньше, чем в мазуте и природном газе. Это снижает «упругость» газа в ДП (при увеличении давления он сжимается в меньшей степени). Следует отметить положительное влияние водорода и оксида углерода, и отрицательное влияние других компонентов летучих веществ: коэффициент замены кокса тем выше, чем больше уголь содержит углерода, водорода и меньше других примесей. Более полное сгорание наблюдается для углей с повышенным количеством летучих веществ: они выделяются уже в полости фурмы, образуются поры в частицах и углерод окисляется быстрее.

При увеличении ПУТ, исключении использования природного газа и снижении расхода кокса количество образующихся в нижней части доменной печи восстановительных газов становиться меньше и увеличивается доля железа, восстанавливаемого за счет углерода кокса (увеличивается степень прямого восстановления – rd). Это существенно снижает эффективность работы доменной печи. Дефицит восстановителя можно ликвидировать за счет вдувания дополнительного (внешнего) источника газа-восстановителя.

В 60–70-х годах XX столетия получили распространение опытно-промышленные плавки с вдуванием в ДП горячих восстановительных газов (ГВГ) [6, 7]. Преимуществом таких технологий является возможность существенного увеличения удельного расхода (на 1т чугуна) вносимых углеводородсодержащих добавок.

Для достижения наиболее полного восстановления шихты и уменьшения rd (до величины, близкой к нулю), ГВГ, наряду с соответствующим удельным расходом, должны иметь, возможно, более высокое содержание $CO + H_2$. В соответствии с опытными плавками и результатами расчетов, эта величина должна достигать 92–95% за счет уменьшения содержания в ГВГ окислителей и азота. Одним из важных технологических требований к составу вдуваемого газа является его стабильность, особенно по содержанию углекислоты, а также оксида углерода. Доля восстановителей в ГВГ линейно влияет на коэффициент замены ими кокса ЭЗГВГ, повышая его при увеличении ($CO + H_2$) в ДП вплоть до 80% [3].

Процесс косвенного восстановления происходит в шахте ДП при взаимодействии газов восстановителей ($CO + H_2$) с оксидами железа (Fe_2O_3, Fe_3O_4 и FeO), поэтому ГВГ рационально подавать в нижнюю часть шахты печи.

Восстановительные газы могут быть получены путем очистки от CO_2 колошникового газа, газификации твердого топлива (угля), конверсии природного газа или мазута и другими способами.

Организация процесса газификации твёрдого топлива обладает рядом недостатков, главными из которых являются малая интенсивность процесса, а также высокое содержание смоляных компонентов в газах [8]. С другой стороны, совершенствование технологии и оборудования в этом направлении позволит решить проблему расширения топливной базы металлургии, что особенно актуально для условий Украины, имеющей большие запасы некоксующихся углей рядовых марок. На основе всестороннего сравнения способов газификации угля с зольностью 40–45%, авторами [9] была показана наибольшая целесообразность процесса парокислородной газификации при температуре 1973–2073 K, расходах кислорода 0,36–0,38 м^3 /кг угля и пара 0,05–0,1 кг/кг угля. При этом доля горючих компонентов генераторного газа ($CO + H_2$) составляет 75–80%, теплота сгорания 9,5–9,8 МДж/м^3, выход ГВГ 1,2–1,3 м^3 /кг угля.

Наиболее распространённый способ получения ГВГ – конверсия ПГ. В зависимости от применяемого окислителя выделяют паровую, углекислотную и кислородную конверсии. Газ-восстановитель получают в результате следующих химических реакций:

$$CH_4 + H_2O \Leftrightarrow CO + 3H_2 - 207 \text{ МДж/кмоль}, \quad (1)$$

$$CH_4 + CO_2 \Leftrightarrow 2CO + 2H_2 - 248 \text{ МДж/кмоль}, \quad (2)$$

$$CH_4 + 0{,}5\,O_2 \Leftrightarrow CO + 2H_2 + 35{,}6 \text{ МДж/кмоль}. \quad (3)$$

Различают конверсию ПГ каталитическую и высокотемпературную. Наилучший катализатор — никелевый с различными добавками. Высокотемпературную конверсию осуществляют в отсутствие катализаторов при температурах 1350–1450 °С.

Основным недостатком кислородной конверсии является относительно низкий выход газов восстановителей — 3 м^3 на 1 м^3 ПГ (3). При паровой и углекислотной конверсии выход ГВГ — 4 м^3/м^3 ПГ (1, 2). При углекислотной конверсии в промышленных условиях в качестве окислителя используют колошниковый газ, содержащий помимо CO_2 большое количество азота и соединения серы, резко снижающие активность никелевого катализатора. Паровая конверсия лишена этих недостатков.

Реакции окисления углеводородов водяным паром эндотермические. Для проведения паровой каталитической конверсии и нагрева ГВГ до 900 °С необходимы затраты тепловой энергии. При этом в качестве топлива можно использовать доменный газ. Это позволит повысить степень использования химической энергии колошникового газа в производстве, так, как его теплота сгорания, израсходованная на конверсию, будет возвращена в доменную печь в виде химической энергии и физической теплоты ГВГ.

Для проведения паровой конверсии ПГ более предпочтительно использовать конвертор непрерывного действия (реформер) с никелевым катализатором, который обеспечит стабильные состав и температуру ГВГ (900–950 °С). При вдувании ГВГ в нижнюю часть шахты ДП такая температура является оптимальной (находится в соответствии с температурным уровнем зоны вдувания в ДП) [10].

По результатам расчета с использованием разработанной математической модели было определено, что при паровой конверсии 1 м^3 ПГ в конверторе непрерывного действия будет получено 4,584 м^3

конвертированного газа с температурой 900 ^{0}C следующего состава: H_2 — 69,2%; CO — 21,3%; H_2O — 7,5%; CO_2 — 1,8%. Расход водяного пара составит 1,187 кг/м^3 ПГ, доменного газа на горелки — 6,85 м^3/м^3 ПГ. При условии совместного вдувания в горн ДП ПУТ (240 кг/т чугуна) и в шахту ГВГ (550 м^3/т чугуна; при расходе природного газа для получения ГВГ 120 м^3/т чугуна) теоретически возможно снижение степени прямого восстановления оксидов железа до 12%, а удельного расхода кокса до 170 кг/т чугуна [3].

Для выбора исходного материала и способа получения ГВГ ввели показатель экономической эффективности получения и использования ГВГ (Ээгвг) в условиях доменного производства, который рассчитывается по формуле:

$$Ээ_{гвг} = C_{гвг} /(C_к * ЭЗ_{ГВГ}), \qquad (4)$$

где $C_{гвг}$, $C_к$ – стоимость ГВГ и стоимость кокса соответственно.

Такой подход позволяет учитывать не только технологические аспекты производства, но и экономическую его составляющую. Так, например, для условий Украины (стоимости ПГ — 273 $/1000 м^3 [11], кокса — 150 $/т) при величине коэффициента замены кокса природным газом 1,2 кг/м^3 показатель Ээгвг = 1,67, что больше 1 и указывает на нецелесообразность использования данной технологии. В то же время, для условий России (стоимость ПГ — 84 $/1000 м^3 [11]) показатель Ээгвг = 0,51 < 1, т.е. использование ГВГ, полученных из ПГ путем паровой конверсии, может существенно снизить себестоимость производства жидкого чугуна за счет снижения расхода кокса.

Технология вдувания ГВГ позволяет повысить энергоэффективность доменного производства, однако для ее реализации требуются значительные капитальные вложения.

В условиях дефицита финансовых ресурсов, для действующих доменных цехов, с целью снижения указанных выше негативных факторов, сопровождающих внедрение технологии вдувания ПУТ, можно рассматривать технологический вариант совместного вдувания ПУТ с оптимальным количеством ПГ. Причем, последнее должно обеспечить не только снижение rd и выравнивание газового потока по радиусу печи, но и уменьшение тепловой нагрузки на ее проблемные зоны.

Углеводороды, попадая в горн печи, в процессе кислородной конверсии (по реакции 3) реформируются с образованием CO и H_2. При этом ПГ в ДП нельзя рассматривать как топливо, т.к. теплосодержание продуктов реакции (с учетом N2 воздушного дутья), покидающих нижнюю ступень теплообмена, выше, чем теплота, выделяемая при конверсии [12]:

$$Q_{пг} = (Qг_{сн} + Q_{фпг} + V_д \times h_д) < V_г \times h_г \qquad (5)$$

где $Q_{пг}$ – тепловой эффект вдувания природного газа в горн, Дж/м^3 ;
$Qг_{сн}$ – количество теплоты выделяемое при кислородной конверсии углеводородов, Дж/м^3;
$Q_{фпг}$ – физическая теплота вносимая природным газом, Дж/м^3;
$V_д$, $V_г$ – расход дутья и выход газов восстановителей м^3/м^3;
$h_д$, $h_г$ – энтальпия дутья и газов восстановителей Дж/м^3.

Вдуваемый в доменную печь природный газ при конверсии в кислороде горячего дутья охлаждает горн печи, перенося часть теплоты нижней зоны теплообмена в верхнюю, тем самым понижая тепловую нагрузку на стенки печи, холодильники фурменной зоны и заплечиков. При этом сокращается приток в нижнюю часть печи недовосстановленных в шахте оксидов железа, последующее восстановление которых резко эндотермично.

В соответствии с уравнением (5), на показатель теплового эффекта вдувания ПГ в горн существенно влияет расход и энтальпия дутья. При средних показателях работы ДП ЧАО «ММК им. Ильича» (температура дутья — 1000 °C, содержание O_2 в горячем дутье — 23%) снижение тепловой нагрузки в горне за счет вдувании 1 м^3 ПГ/т чугуна составит порядка 2 МДж/т чугуна. В результате расчета двухзонного теплового баланса ДП (с учетом изменения расхода кокса и других параметров) получено, что снижение тепловой нагрузки в нижней зоне печи составит — 3,4 МДж/т чугуна на 1 м^3 ПГ/т чугуна. При про-

изводительности печи 2600 т/сутки снижение среднечасовой тепловой нагрузки составит – 101,2 кВт/ч на 1 м³ ПГ/т чугуна.

В 2016 г. на ЕМЗ сотрудниками ИЧМ НАНУ проводился анализ режимов работы ДП №3 с безгазовой шихтой, с вдуванием: ПГ, ПГ и ПУТ, а также угольной пыли. При изменении указанных технологических режимов существенно изменялось температурное поле футеровки шахты, распара и заплечиков ДП (рис. 4).

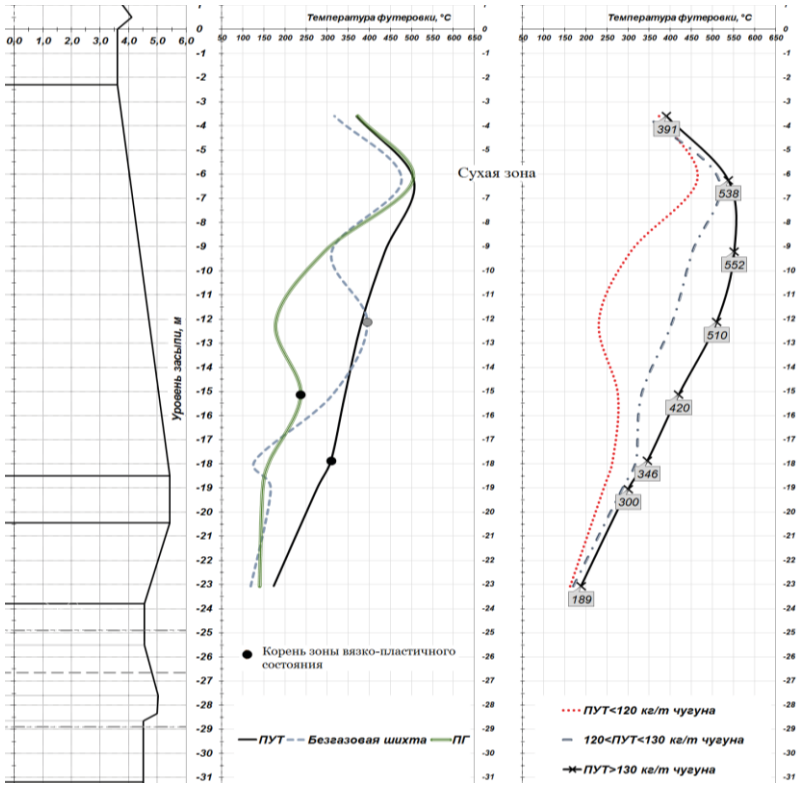


Рис.4 Распределение температур футеровки ДП №3 по ее высоте при работе на безгазовой шихте, с ПГ в дутье и с различным расходом ПУТ (данные ИЧМ НАНУ)

Как следует из рисунка 4, при вдувании ПУТ с расходом более 130 кг/т чугуна, по сравнению с остальными режимами, температуры футеровки по всей высоте печи максимальные, при этом на уровне середины шахты температуры футеровки достигают 550 °С, также на этом уровне максимальная амплитуда изменения температур.

В ходе проведения эксперимента средняя тепловая нагрузка на холодильники в зоне горна и заплечиков составила 1,081 МВт при общей площади холодильников Fx = 102,47 м² , в зоне распара и низа шахты (2 ряда холодильников) – 3,922 МВт при величине Fx = 174,80 м². Средняя тепловая нагрузка на 1 м² холодильников в этих зонах составила 65 МДж/(м²*ч). Таким образом, при совместном вдувании с ПУТ природного газа можно достичь снижения тепловой нагрузки на холодильники в зоне «горн — низ шахты» до 2% на каждый 1 м³ вдуваемого ПГ/т чугуна. Для зоны «горн – середина шахты (7 рядов холодильников шахты)» средняя тепловая нагрузка на 1 м² холодильников составит 72 МДж/(м²*ч), а величина охлаждающего эффекта от вдуваемого ПГ (1 м³ /т чугуна) достигает 1%.

Оптимальный расход ПГ, вдуваемого совместно с ПУТ, определяется исходя из конкретных условий работы доменного цеха, с учетом особенностей конструкции ДП, а также решаемой задачи (снижение расхода кокса, дополнительное увеличение расхода ПУТ, уменьшение тепловой нагрузки на холодильники и др.).

Список литературы

1. А.А. Томаш Традиционные и новые методы расчёта теплового баланса доменной плавки / А.А. Томаш, А.В. Сущенко, М.А. Томаш // Вісник ПДТУ. — Вип. 18. — 2008. — С. 9–14.
2. Применение в Украине технологии доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива / В.И. Большаков // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. — Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2011. — Вип. 23. — С. 30–36.
3. М.А. Томаш Совершенствование технологии доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива / М.А. Томаш, А.В. Сущенко / / Металл и литье Украины. — Вып. 11. — 2013 — С. 35–41.
4. Пылеугольное топливо – реальная и эффективная альтернатива природному газу в металлургии / С.Л. Ярошевский. — Донецк: Норд-Пресс, 2006. — 16 с.
5. Золотухин Ю.А., Андрейчиков Н.С., Куколев Я.Б. Требования к качеству кокса для доменных печей, работающих с различным удельным расходом пылеугольного топлива// Кокс и химия. — 2009.— № 3. — С. 25–31.
6. Тихомиров Е.Н. Комбинированное дутьё доменных печей. — М.: Металлургия, 1974. — 160 с.
7. Тихомиров Е.Н. Восстановительные газы и кислород в доменном производстве. — М.: Металлургия, 1982. — 104 с.
8. Товаровский И.Г. Анализ показателей и процессов доменной плавки. — Днепрпетровск: Пороги, 2000. — 420 с.
9. Потапов Б.Б., Пинчук В.А. Исследование и разработка режимов поточной газификации углей украинских месторождений // Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. — Днепропетровск: НМетАУ. — 2000. — С. 106–112.
10. М.А. Томаш Применение пароводяной конверсии природного газа в доменном производстве / М.А. Томаш, А.В. Сущенко / / Вісник ПДТУ. — Вып. 21. — 2011.
11. Андронов В.Н. Минимально возможный расход кокса и влияние на него различных факторов доменной плавки // Учебное пособие. СПб.: изд-во СПбГТУ, 2001. — 142 с.

В.В. Филиппов, В.А. Михалёв, К.В. Миронов, А.А. Форшев,
АО «ЕВРАЗ НТМК»
Б.С. Тлеугабулов, С.А. Загайнов,
Уральский ФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ ВАНАДИЕВОГО ЧУГУНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Выплавка передельного ванадиевого чугуна в доменном цехе АО «ЕВРАЗ НТМК» осуществляется на двух доменных печах, полезным объёмом 2200 м^3 каждая. Особенностями существующей технологии являются:

- использование в железорудной части шихты титансодержащего окускованного сырья АО «ЕВРАЗ КГОК» и ванадийсодержащего железофлюса ОАО «ВГОК»;
- высокая интенсивность плавки, обусловленная большим содержанием кислорода в дутье;
- низкий расход кокса из-за широкого применения пылеугольного топлива и природного газа.

Конечной целью доменной плавки титаномагнетитовых руд, наряду с восстановлением железа, является извлечение из руд ванадия. Правильная организация доменного процесса должна обеспечивать наиболее полный перевод ванадия в чугун и наименьшие его потери с другими продуктами плавки.

За более чем 75-летний опыт освоения доменной плавки титаномагнетитов установлено, что основными условиями высокого извлечения ванадия в чугун являются повышенный приход тепла и повышенная основность шлака. Однако эти же факторы способствуют восстановлению диоксида титана и карбидообразованию в горне печи [1]. Поэтому зависимость извлечения ванадия от температуры и основности более сложная. Технологический режим доменной плавки устанавливается путем компромисса и определяется, с одной стороны, извлечением ванадия, а с другой, той интенсивностью восстановления титана, при которой еще сохраняется возможность нормальной эксплуатации печи. Поскольку доменная плавка осуществляется при избытке углерода, для предотвраще-

ния чрезмерного восстановления титана желателен интенсивный и по возможности более холодный ход печи. При этом имеют значение все факторы, способствующие ровной и интенсивной работе печи.

В доменном производстве НТМК за последние годы достигнуто существенное увеличение интенсивности плавки (рис. 1).

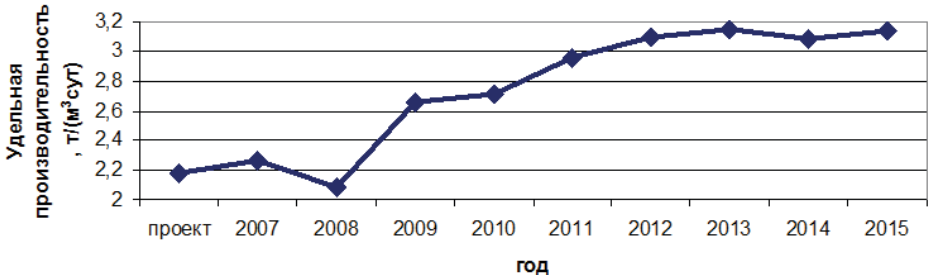


Рис. 1. Изменение удельной производительности доменных печей в среднем по цеху

В числе мероприятий, обеспечивших это, можно выделить следующие наиболее значимые:

1 — реконструкция доменной печи № 6 в 2004 г. и доменной печи № 5 в 2006 г. [2];

2 — планомерное снижение содержания кремния в чугуне (с 0,15–0,20 до 0,05–0,01%) [3];

3 — внедрение технологии плавки с использованием ванадийсодержащего железофлюса — 2009 г. [4];

4 — повышение содержания кислорода в дутье с 24 до 30% в период 2010–2011 гг.;

5 — внедрение технологии использования пылеугольного топлива (ПУТ) совместно с природным газом в конце 2012 — начале 2013 гг. [5].

Проведенная реконструкция доменных печей позволила усовершенствовать ряд технологических параметров выплавки ванадиевого чугуна [2]. В частности, установка на печах БЗУ обеспечила возможность повышения давления газов в печи, что и создало предпосылки снижения содержания кремния в чугуне и, как следствие, подавление процессов образования тугоплавких соединений титана, повышение производительности печей, снижение расхода кокса, увеличение степени извлечения ванадия.

Внедрение технологии плавки с использованием ванадийсодержащего железофлюса привело к следующим изменениям технико-экономических показателей: удельная производительность возросла с 2,4 до 2,8 т/м^3·сут, расход кокса снижен с 421 до 403 кг/т чугуна (т.е. на 18 кг/т), непосредственно в доменной плавке коэффициент извлечения ванадия (КИВ) возрос на 2,5–3% (с 83,5 до 86,3%).

Использование железофлюса при выплавке ванадиевого чугуна исключило из состава доменной шихты аглоотсев, известняк и марганцевый агломерат. Это обеспечило как улучшение газопроницаемости шихты, так и снижение удельного выхода газов (за счет исключения CO_2 известняка и снижения расхода кокса). Снижение удельного выхода колошниковых газов составило ~ 50 м^3/т чугуна. Таким образом, использование железофлюса при выплавке ванадиевого чугуна обеспечивает возможность осуществлять интенсифицирующие и энергосберегающие мероприятия без опасения за нарушение ровного хода печей. Поэтому следующим закономерным мероприятием по интенсификации плавки, осуществленным в доменном цехе, было увеличение содержания кислорода в дутье (рис. 2).

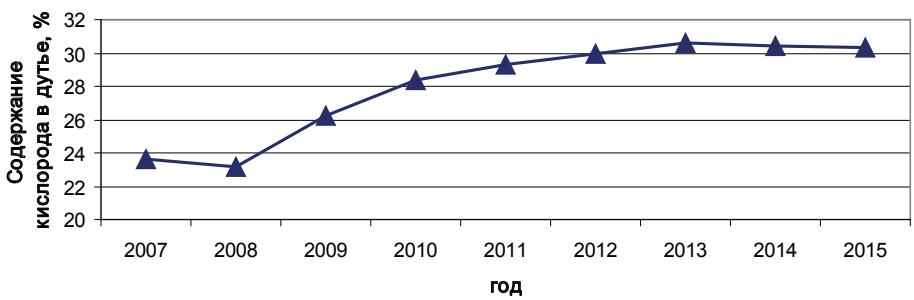


Рис. 2. Изменение содержания кислорода в дутье при выплавке ванадиевого чугуна

Обогащение дутья кислородом уже более 60 лет широко применяется для интенсификации доменного процесса и к настоящему времени накоплен большой промышленный опыт его использования. Но воздействие данного фактора на показатели выплавки даже обычного передельного чугуна все еще является спорным и неоднозначным, особенно, в части экономичности производства и установления конкретных зависимых значений. Сведения же о влиянии различной доли кислорода в дутье на изменение производительности печей и удельный расход кокса при переработке титаномагнетитов недостаточны из-за ограниченного распространения технологии плавки ванадиевого чугуна, и их тем более нельзя считать априорными.

Из-за особенностей доменной плавки титаномагнетитов, эффект по приросту производства от использования кислорода на ванадиевой плавке (по действующим инструкциям) оценивается всего лишь в 1,3% (на 1% кислорода), т.е. вдвое меньше, чем на передельной плавке. Это связано с тем, что обогащение дутья кислородом повышает теоретическую температуру горения топлива в фурменном очаге и увеличивает приход тепла в высокотемпературную зону доменной печи. Поэтому содержание кислорода в дутье ограничивалось из-за увеличения степени восстановления титана и неустойчивой, в связи с этим, работы печи.

Однако, повышение доли кислорода в дутье сопровождается возрастанием парциального давления CO в горновых газах и интенсивности плавки, что затормаживает карбидообразование титана. Увеличение парциального давления монооксида углерода смещает равновесие реакций восстановления титана в обратном направлении. При повышении же производительности печи усиливаются различия между скоростями восстановления железа и титана, что приводит к снижению содержания последнего в чугуне и уменьшению, в дальнейшем, выделений карбидов титана из чугуна (рис. 3).

Рис. 3. Влияние производительности доменной печи на восстановление титана

Таким образом, увеличение содержания кислорода в дутье действует на карбидообразование титана в противоположных направлениях, и данное мероприятие при выплавке ванадиевого чугуна необходимо признать эффективным.

Анализ по оценке влияния интенсивности плавки на КИВ показал, что по мере увеличения производительности доменных печей данный показатель возрастает (рис. 4). При этом потери ванадия со шлаком не изменяются и остаются на прежнем уровне — около 7% (отн.). Причинами же увеличения КИВ являются снижение доли потерь чугуна, уменьшение выноса пыли, а значит и шламов, и значительное (в 3 раза) сокращение потерь ванадия с газом, определенное по невязке баланса. Действительно, интенсификация плавки как за счет использования железофлюса, так и за счет повышения кислорода в дутье приводит к снижению удельного выхода колошникового газа. Второе мероприятие дополнительно еще и снижает его температуру. Все это обеспечивает условия, препятствующие улетучиванию высших оксидов ванадия.

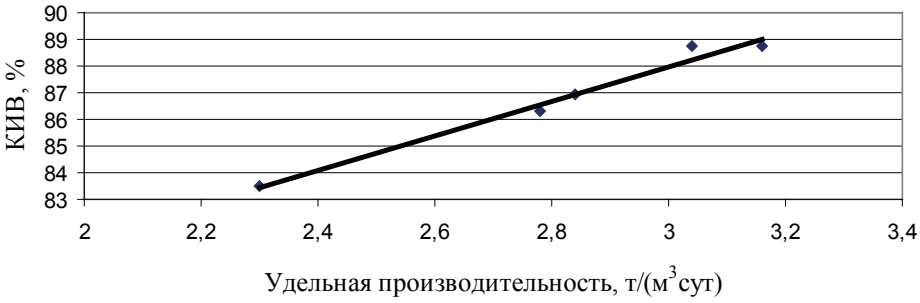


Рис. 4. Влияние интенсивности плавки на коэффициент извлечения ванадия

После принятия решения об использовании пылеугольного топлива (ПУТ) в доменных печах АО «ЕВРАЗ НТМК» и в процессе строительства комплекса ПУТ были изучены рекомендации фирмы «Paul Wurt» по качеству углей и составу шихты ПУТ, а также выполнен расчетно-теоретический анализ изменения условий плавки при вдувании ПУТ.

Результатами предварительных исследований было показано, что:

- причиной изменения газодинамического режима доменной плавки при вдувании ПУТ является изменение порозности столба шихтовых материалов в результате снижения удельного расхода кокса и увеличения рудной нагрузки;
- наиболее существенно порозность шихты изменяется в нижней зоне печи;
- для сохранения порозности в нижней зоне печи, снижение расхода кокса может быть компенсировано повышением горячей прочности кокса;
- наибольшее влияние на газодинамическое сопротивление оказывает изменение давления при небольших рудных нагрузках и малом эквивалентном диаметре кусковых материалов;
- по мере повышения расхода ПУТ (и снижения расхода кокса) показатель газодинамического напряжения прогрессивно увеличивается;
- по мере сокращения расхода кокса скорость схода шихты снижается, однако минутный расход шихты (т/мин) увеличивается;
- основные изменения теплового состояния низа печи будут вызваны изменением степени косвенного восстановления железа, то есть тепловой работы верхней зоны печи;
- вязкость образующегося шлака из смеси зол кокса и ПУТ не выше, а в большинстве случаев ниже, вязкости образующегося шлака только из золы кокса.

Промышленное освоение использования ПУТ на доменных печах АО «ЕВРАЗ НТМК» началось в декабре 2012 г. на ДП № 5 и с января 2013 г. на ДП № 6. И в том, и в другом случае выход на потребление ПУТ свыше 100 кг/т осуществлен примерно на 12 сутки, исключая периоды тестирования.

Помесячное освоение технологии применения пылеугольного топлива на доменных печах 5 и 6, а также связанное с этим изменение расхода кокса и природного газа показано на рис. 5 и 6.

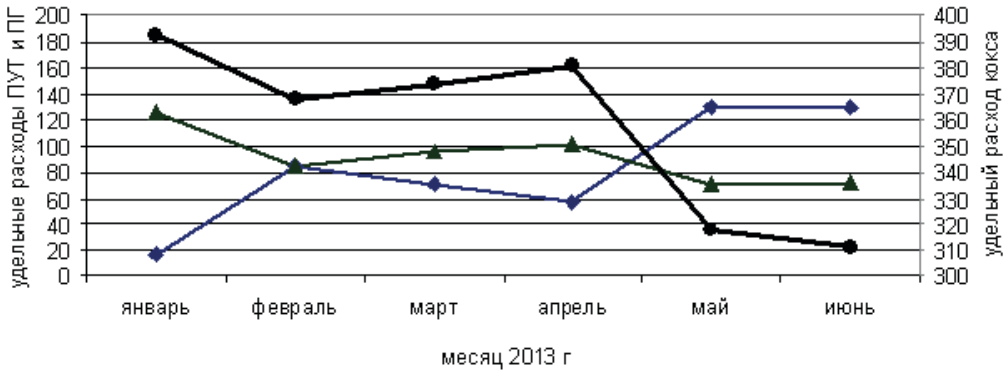


Рис. 5. Изменение расхода энергоносителей по ДП №6 за I полугодие 2013 г.

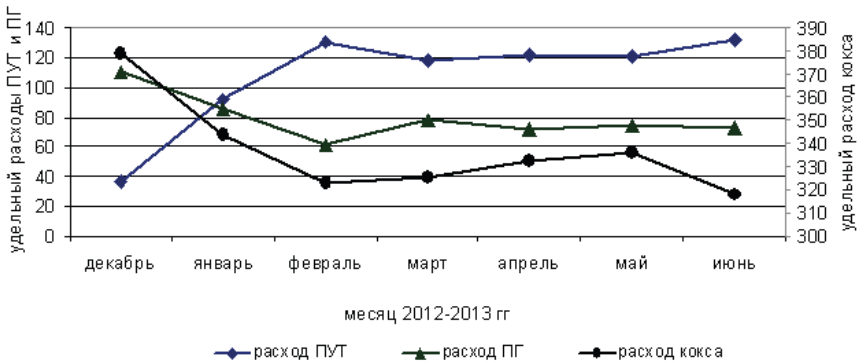


Рис. 6. Изменение расхода энергоносителей по ДП №5 за 7 месяцев 2012–2013 гг.

Как видно из этих графиков, относительно стабильный средний расход ПУТ, превышающий уровень расхода 100 кг/т чугуна, достигался после 2 месяцев работы (пониженный среднемесячный расход ПУТ на ДП № 6 в марте-апреле связан с проведением капитального ремонта). При этом увеличение расхода пылеугольного топлива компенсировалось одновременно — как снижением расхода кокса, так и сокращением количества вдуваемого природного газа.

Таблица 1. Основные показатели работы доменных печей в 2012–2013 гг.

Показатели	периоды работы ДП № 5			периоды работы ДП № 6		
	2012 г.	I-VI 2013	июнь-июль 2013	2012 г.	I-VI 2013	май-июнь 2013
Производство, т/сутки	6 831,7	7030,5	7221, 5	6 795,4	6895,5	7085,3
Производительность, т/м^3•сутки (фактич.)	3,17	3,24	3,32	3,16	3,19	3,27
Расход кокса, кг/т чугун	388,5	329,9	321,1	406,8	355,6	314,5
Расход природного газа, м^3/т чугуна	130,6	74,1	73,5	132,8	91,3	71,5
Расход ПУТ, кг/т чугуна	3,1	119,1	129,7	0	82,8	129,6
Расход суммарного топлива, кг/т чугуна	492,7	496,3	496,6	509,8	503,2	488,2
Расход ЖРС, т/т чугуна	1,665	1,644	1,646	1,674	1,658	1,651
Интенсивность по коксу, т/м^3 сутки	1,207	1,054	1,054	1,256	1,115	1,013
Интенсивность по ЖРС, т/м^3 сутки	5,173	5,255	5,402	5,176	5,198	5,317

Анализ работы доменных печей в первом полугодии 2013 г. (с использованием ПУТ) в сопоставлении с периодом за 2012 г. (без использования ПУТ) приведен в табл. 1. Дополнительно рассмотрены периоды работы доменных печей с расходом ПУТ на уровне 130 кг/т — июнь–июль 2013 г. для печи № 5 и май–июнь для печи № 6.

Последовавшее после внедрения технологии применения ПУТ увеличение рудной нагрузки, позволило повысить давление дутья и перепад давления в противоточной зоне печи. Содержание кислорода в дутье увеличилось в среднем на 1–1,5%. В связи с этим, увеличилась интенсивность плавки по «руде» и возросла производительность печей. Влияние расхода ПУТ на изменение удельной производительности печей по статистическим данным показано на рис. 7.

Поскольку увеличение расхода пылеугольного топлива компенсировалось одновременно — как снижением расхода кокса, так и сокращением количества вдуваемого природного газа, в колошниковом газе заметно снизилось содержание водорода и, соответственно, повысилось содержание CO и CO_2. Полная или частичная замена природного газа угольной пылью увеличивает по расчетам (рис. 8) содержание CO в горновых газах.

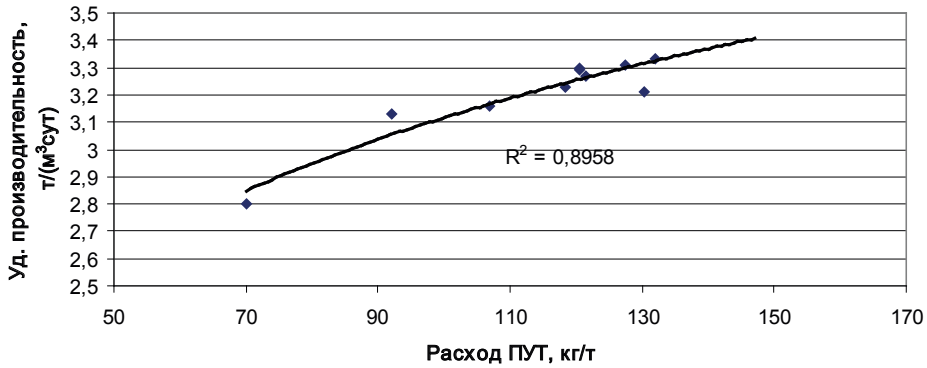


Рис. 7. Влияние расхода ПУТ на изменение производительности печей

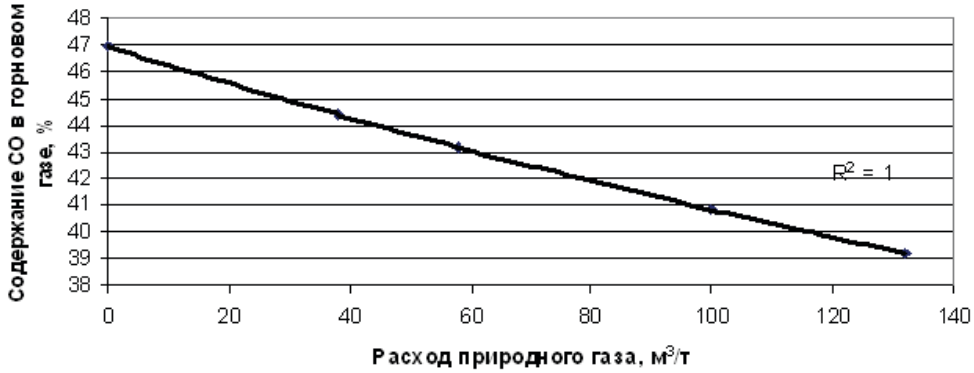


Рис. 8. Влияние замены природного газа эквивалентным расходом ПУТ на содержаине СО в горном газе

В целом, как отмечено в работе [5], пылеугольное топливо может успешно применяться в доменной плавке титаномагнетитов и, благодаря увеличению интенсивности плавки, повышению парциального давления монооксида углерода в горновых газах и снижению активности оксидов титана в шлаке (за счет некоторого увеличения выхода шлака при замещении природного газа), даже снижает развитие процессов карбидообразования титана.

Факторами, ограничивающими эффективную работу доменных печей и расход ПУТ, является его качество, а также качество кокса и железорудного сырья. Нестабильное тепловое состояние печи связано, в основном, с системой подготовки и подачи ПУТ. Нестабильность качества ПУТ существенно ограничивает его использование. Это вынуждает создавать резервы по нагреву печи. Кроме того, допустимое (по условиям газодинамики) количество вдуваемого ПУТ зависит от качества кокса и железорудного сырья.

Основная цель использования ПУТ заключается в снижении себестоимости чугуна за счет минимизации расхода кокса путем замещения его более дешевыми топливными добавками. Замещение природного газа ПУТом, даже без учета изменения стоимости кокса (в связи с требованиями повышения его качества и неизбежным изменением структуры коксовой шихты, т.е. увеличением в составе шихты доли более дорогостоящих коксовых и жирных углей), не обеспечивает снижение себестоимости чугуна в настоящее время. Поэтому в обозримом будущем наиболее экономичной будет технология совместного вдувания природного газа и ПУТ [6]. В связи с этим, должны быть более детально исследованы особенности данной технологии с уточнением параметров взаимозамещения и корректировании коэффициентов влияния технологических факторов на основные показатели доменной плавки.

Перечисленные проблемы предопределяют дальнейшее направление работ по совершенствованию технологии доменной плавки титаномагнетитов.

Список литературы

1. Гаврилюк, Г.Г. Доменная плавка титаномагнетитов. / Гаврилюк Г.Г., Леконцев Ю.А., Абрамов С.Д. // Тула: АССОД, 1997. — 216 с.
2. Внедрение инновационных решений для совершенствования технологии выплавки ванадиевого чугуна на НТМК. / Кушнарев А.В., Киричков А.А., Филиппов В.В., Михалёв В.А., Загайнов С.А., Тлеугабулов Б.С. // Сборник тезисов докладов I международной научно-практической конференции «ИНТЕХМЕТ-2008» — СПб, 2008. С. 76–77.
3. Внедрение технологии выплавки низкокремнистых чугунов на НТМК / Кушнарев А.В., Филатов С.В., Киричков А.А., Филиппов В.В., Гильманов М.Р., Михалёв В.А., Загайнов С.А., Тлеугабулов Б.С., Собянина О.Н. // Бюллетень Черметинформация «Черная металлургия». — 2011. — № 3. С. 42–45.
4. Разработка технологии доменной плавки титаномагнетитов с использованием железофлюса. / Б. С. Тлеугабулов, Загайнов С.А., Филатов С.В., Филиппов В.В., Гильманов М.Р. // Бюллетень Черметинформация «Черная металлургия». — 2010. — № 4. С. 13–18.
5. Пылеугольное топливо может успешно применяться в доменной плавке титаномагнетитов. / Филиппов В.В., Кушнарев А.В., Загайнов С.А., Тлеугабулов Б.С., Михалёв В.А., Фомичев М.С., Миронов К.В., Баранов Е.Н. // Бюллетень Черметинформация «Черная металлургия». — 2014, № 3. — С. 42–46.
6. Некоторые теоретические аспекты технологии совместного вдувания природного газа и пылеугольного топлива. / Смирнов Л.А., Тлеугабулов Б.С., Загайнов С.А., Пыхтеева К.Б., Филиппов В.В., Михалёв В.А., Миронов К.В. // Бюллетень Черметинформация «Черная металлургия». — 2016, № 5. — С. 19–22.

В.И. Набока, ПАО «Запорожсталь»

ВЛИЯНИЕ ФУТЕРОВКИ И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ШАХТЫ НА РАСХОД КОКСА И РЕСУРС РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ» ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

С 2008 г. доменные печи Украины начали переводить от технологии работы с природным газом к технологии доменной плавки с пылеугольным топливом (ПУТ). При этом в 2–3 раза уменьшился ресурс работы заплечиков и низа шахты печи, что снижает продолжительность кампании печи и является одной из причин ухудшения технико-экономических показателей доменной плавки и эффективности этой технологии на доменных печах Украины в сравнении с передовой мировой практикой [1–5] (рис. 1).

Специалисты ПАО «Запорожсталь» одними из первых в Украине подошли комплексно к решению задач увеличения эффективности доменной плавки с применением ПУТ. На комбинате ведется систематическая работа с привлечением проектных и научных организаций по увеличению ресурса и технико-экономических показателей доменной плавки по следующим направлениям:

- улучшение конструкции и профиля печи;
- применение современных огнеупоров и холодильников с высокой теплоотводящей способностью в заплечиках и шахте;
- совершенствование системы охлаждения шахты с химически очищенной водой;
- изменение конструкции фурменных приборов;
- установка автоматизированных систем контроля тепловой работы и разгара футеровки печи;
- выбор рационального расхода ПУТ, дутьевого, газодинамического и режима загрузки с учетом конструкции и технического состояния печи;
- модернизация и совершенствование средств контроля и управления радиальным распределением, восстановительной и тепловой работой газового потока и сжиганием ПУТ.

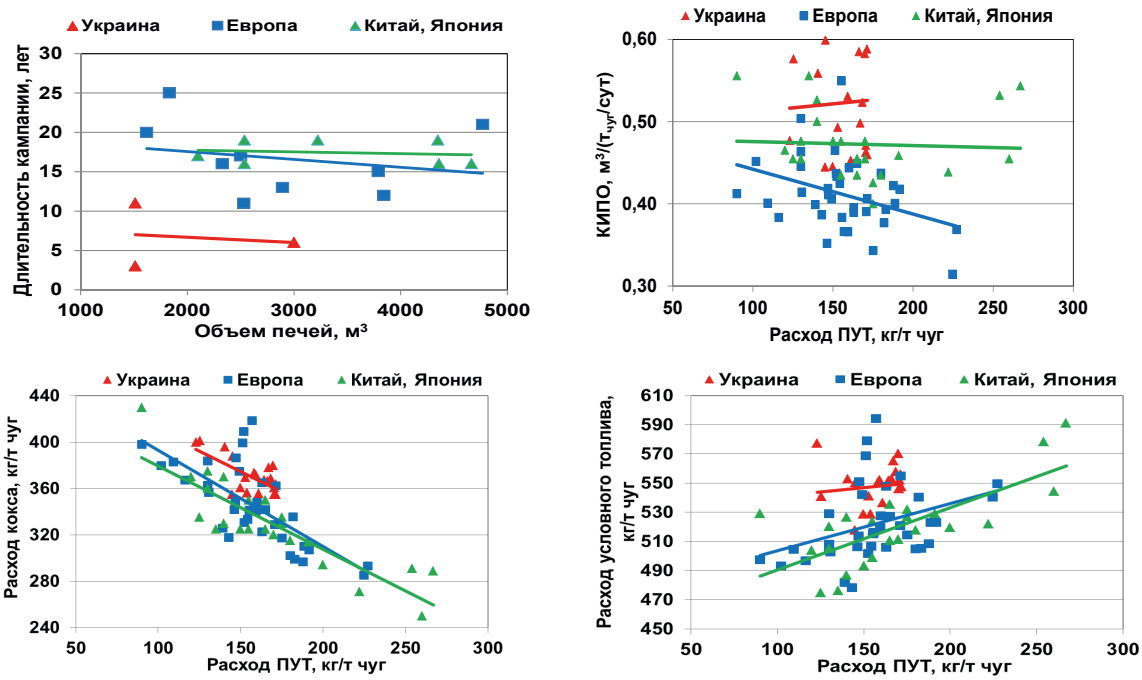


Рис. 1. Сопоставление с зарубежной практикой длительности кампании и лучших показателей работы с ПУТ доменных печей ПАО «Запорожсталь», ЧАО «ММК им. Ильича» и ПАО «АМК»

В 2014 г. на ДП №4 ПАО «Запорожсталь» была завершена реконструкция, во время которой была измена схема охлаждения и футеровка шахты. Ранее неохлаждаемая зона (верхняя треть шахты) была оснащена холодильниками с водяным охлаждением и шамотной футеровкой. Нижняя и средняя части шахты оснащены традиционной системой испарительного охлаждения (СИО) и зафутерованы методом шоткретирования огнеупорной массой фирмы B&K.

В 2015 г. на ДП №2 ПАО «Запорожсталь» был выполнен расширенный капитальный ремонт второго разряда с заменой холодильных плит и футеровки шахты. В отличие от ДП №4 на ДП №2 впервые в Украине были применены новые решения с установкой в шахте двух рядов вертикальных медных холодильных плит (ХП) и футеровки из карбидокремниевого огнеупора (рис. 2).

Полезный объем ДП №2 и №4 и техническое оснащение (загрузочное устройство, средства АСУ) сопоставимы. Заплечики и шахта ДП №4 и №2 охлаждаются системой испарительного охлаждения (СИО) с принудительной циркуляцией воды. Верхняя часть шахты ДП №2 — неохлаждаемая, ДП № 4 — охлаждается технической водой.

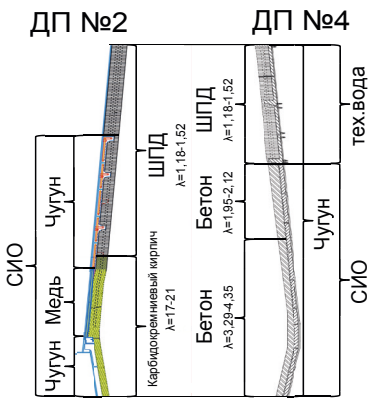


Рис. 2. Сопоставление конструкции футеровки и системы охлаждения доменных печей №2 и №4 ПАО «Запорожсталь»

На ДП № 2 и № 4 реализованы системы автоматизированного контроля тепловой работы и разгара футеровки шахты (САК «Шахта») и контроля общих тепловых потерь в системе охлаждения (САК «Тепловые потери»), разработанные ИЧМ НАНУ (рис. 3).

Информация, поступающая от систем «Шахта» и «Тепловые потери», позволяет проанализировать влияние конструкций исследованных печей и технологического режима плавки на разгар футеровки, тепловые потери и расход кокса на их покрытие, принимать научно-обоснованные решения, направленные на увеличение ресурса и экономичности доменной плавки с применением ПУТ в следующих направлениях [1]:

- совершенствование конструкции, системы охлаждения и футеровки шахты при проведении капитальных ремонтов;
- планирование регламента работ по восстановлению футеровки;
- своевременная закачка огнеупорных бетонов между кожухом и холодильными плитами;
- корректирование расхода ПУТ, дутьевого, газодинамического и режима загрузки, состава шихты.

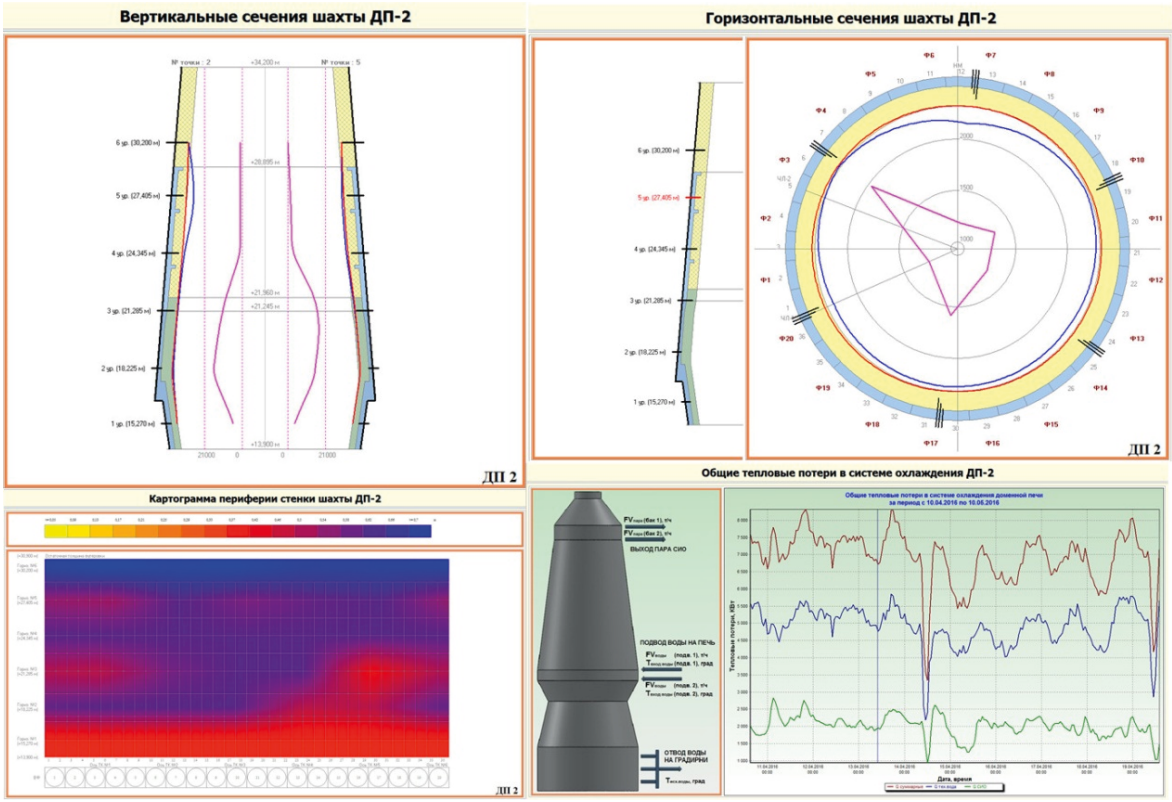


Рис. 3. Видеокадры САК «Шахта» и «Тепловые потери», установленных на ДП №2 ПАО «Запорожсталь»

Результаты сопоставления разгара футеровки, образования гарнисажа и тепловых потерь в системе охлаждения ДП № 2 с ДП № 4 ПАО «Запорожсталь» за год их эксплуатации от задувки после капитального ремонта показали, что комплексное сочетание качественной футеровки и медных холодильников выгодно отличает показатели тепловой работы шахты ДП № 2 от шахты ДП № 4 (рис. 4, табл. 1).

На ДП № 2, в отличие от ДП № 4, не выявлена взаимосвязь между разрушением футеровки, увеличением расхода ПУТ и концентрации кислорода в дутье. Это связано с физико-химическими свойствами футеровки ДП № 2, которые препятствуют ее износу под воздействием тепловых, химических нагрузок и истирания.

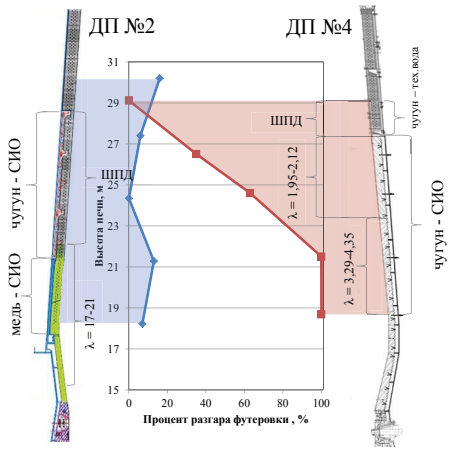


Рис. 4. Сопоставление степени разгара футеровки ДП №2 и ДП №4 ПАО «Запорожсталь» за первые 12 месяцев их эксплуатации от задувки после капитальных ремонтов

Таблица 1. Сравнение показателей разгара футеровки, образования гарнисажа и тепловой работы шахты ДП №2 и ДП №4 за первые 12 месяцев работы печей (по данным САК «Шахта»).

ДП №2			ДП №4		
Разгар футеровки:					
Ряд ХП	%	мм	Ряд ХП	%	мм
1	7	40	2	100	365
2–3	13	75	4	100	419
4–5	0	0	6	63	302
6–7	6	34	7	33	169
Неохл.часть	16	129	8–9	0	0
Толщина гарнисажа*:					
Ряд ХП	мм		Ряд ХП	мм	
1	38		2	13**	
2–3	46		4	19**	
4–5	41		6	96	
6–7	195		7	93	
Неохл.часть	59		8–9	0	
Тепловые нагрузки на футеровку и холодильные плиты*:					
Ряд ХП	кВт/м²		Ряд ХП	кВт/м²	
1	20		2	16**	
2–3	15		4	15**	
4–5	1,9		6	4,3	
6–7	1,4		7	3,6	
Неохл.часть	0,9		8–9	1,1	
Общие тепловые потери***:					
МВт			МВт		
6,9			21,8		
Расход кокса на покрытие общих тепловых потерь***:					
кг/т чугуна			кг/т чугуна		
13,4			41,9		

* — среднее значение за 12 месяцев с задувки печей;

** — среднее значение до выхода термопар из строя, после чего было невозможно контролировать тепловые нагрузки и толщину гарнисажа.

*** — данные, полученные по результатам работы систем автоматизированного контроля тепловых потерь в системах охлаждения (февраль/март 2016 — июнь 2016).

Износ футеровки шахты ДП №4 минимум в 10 раз превысил износ футеровки ДП №2 (рис. 4). Торкретбетон, толщиной от 365 до 419 мм в зоне контроля, применяемый внизу шахты ДП №4 (от 2-го до 5-го ряда ХП), полностью разрушился в течение первых четырёх месяцев эксплуатации. Износ середины шахты, где также применяется торкретбетон, толщиной от 480 до 517 мм в зоне контроля, составил 63% на уровне 6-го ряда ХП шахты и 33% на уровне 7-го ряда ХП, расположенного перед стыком зон шахты, охлаждаемых СИО и технической водой. В зоне охлаждения технической водой признаки разрушения футеровки из шамотного кирпича не наблюдались.

За 12 месяцев работы футеровки охлаждаемой части шахты ДП № 2 наибольший износ, не превышающий 13% от ее первоначальной толщины, наблюдается в наиболее термически напряженной части шахты — на стыке чугунных и медных холодильников в зоне футеровки из карбидокремниевого кирпича (рис. 3). Наименьший износ в охлаждаемой части шахты наблюдается в зоне, изначально футерованной шамотным кирпичом, где он отсутствует на стыке 4-го и 5-го ряда холодильных плит шахты и составляет 6% на стыке 6-го и 7-го ряда ХП. Проектная толщина футеровки охлаждаемой части не изменяется по высоте и составляет 577 мм. В неохлаждаемой части шахты ДП № 2 футеровка изношена на 16% от ее начальной толщины (805 мм). В среднем износ футеровки по шахте ДП № 2 составляет 8,4%.

Наиболее заметное влияние на разрушение футеровки на нижних горизонтах шахты в первые четыре месяца от задувки ДП № 4 после реконструкции оказывало количество ПУТ [1] (рис. 5). При этом на ДП № 2 взаимосвязь между разрушением футеровки и увеличением расхода ПУТ не прослеживается.

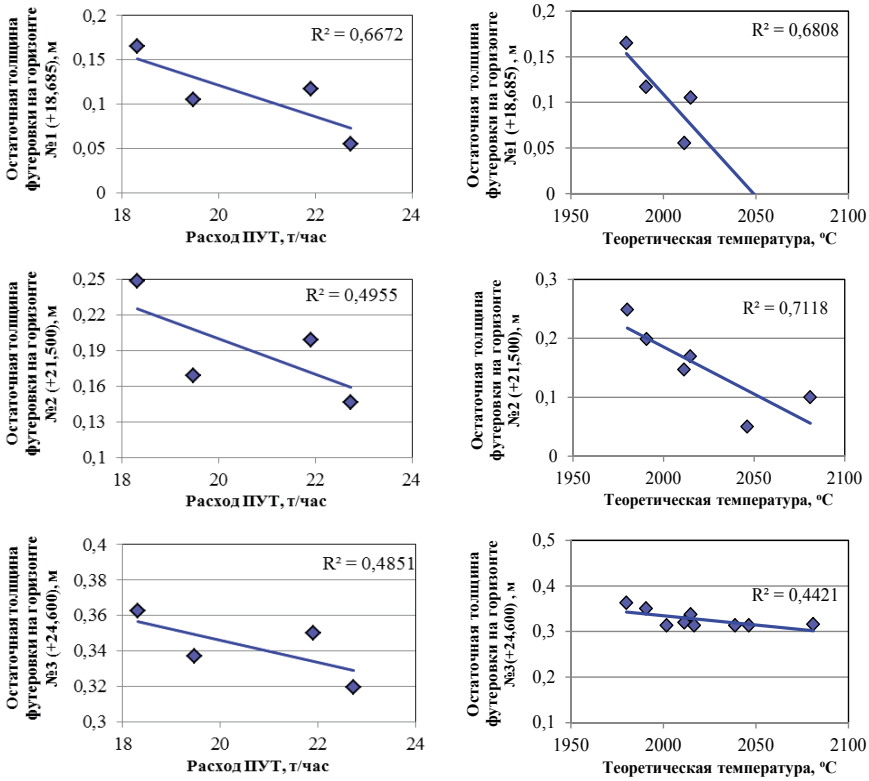


Рис. 5. Взаимосвязь разгара футеровки с расходом ПУТ и теоретической температурой на ДП № 4

Сочетание медных холодильников и рациональной толщины футеровки на ДП № 2 позволило создать условия для умеренного отвода теплоты и стабильного гарнисажного покрытия толщиной от 38 до 195 мм (рис. 6). Максимальная толщина гарнисажа и его нестабильность соответствовала стыку охлаждаемой и неохлаждаемой частей шахты (рис. 6).

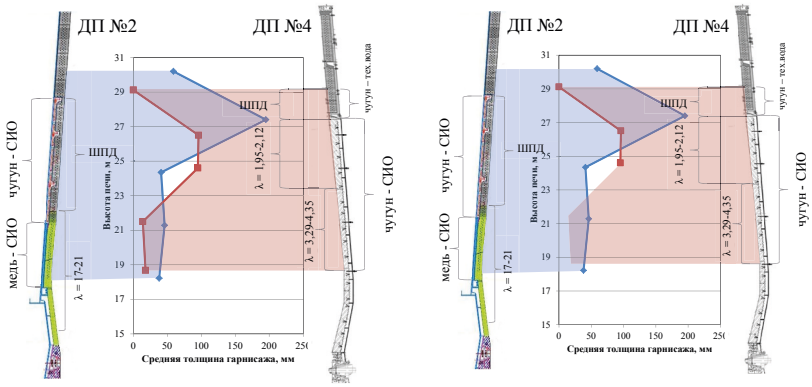


Рис. 6. Сравнение средней толщины гарнисажа по высоте шахт ДП №2 и ДП №4 ПАО «Запорожсталь» за первые 12 месяцев их эксплуатации от задувки после пуска

На обеих печах наблюдается тенденция к уменьшению толщины гарнисажного слоя в направлении от верха к низу шахты. На ДП № 4 вследствие применения менее теплопроводного огнеупорного торкретбетона и чугунных холодильников толщина гарнисажа внизу шахты была в два раза меньше и менее стабильна, чем на ДП № 2, и составляла от 14 до 18 мм (рис. 6). Через четыре месяца от задувки ДП № 4, после разрушения футеровки и повреждения датчиков САК «Шахта», контролировать толщину гарнисажа внизу шахты не представлялось возможным.

На нижних горизонтах шахты ДП № 2 и ДП № 4 прослеживается уменьшение толщины гарнисажа с увеличением расхода ПУТ (рис. 7). Это может быть связано с тем, что при сжигании ПУТ в фурменной зоне формируется газовый поток с содержанием серы и компонентов из золы кокса (SiO_2 и другие), которые препятствуют образованию гарнисажа и способствуют процессам его термохимического разрушения.

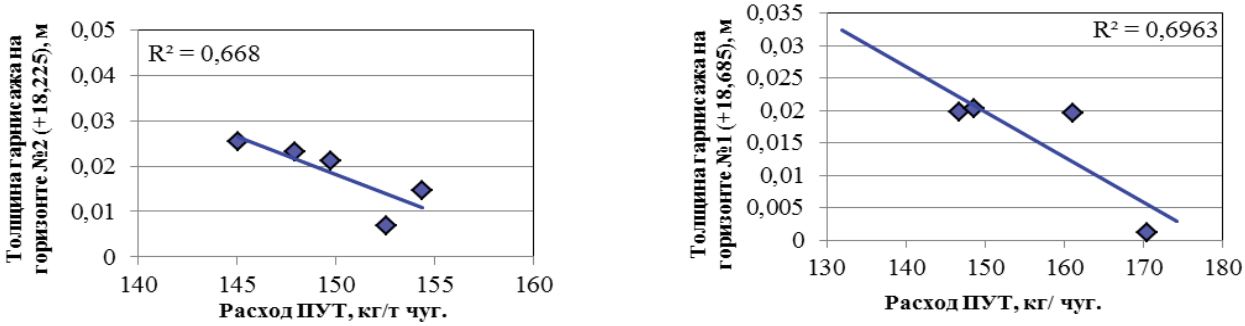


Рис. 7. Взаимосвязь толщины гарнисажа с расходом ПУТ на ДП № 2 и № 4

Для ДП № 2 установлено, что наибольшее влияние на уменьшение толщины гарнисажа по всей высоте ее шахты оказывает применение сварочного шлака.

Прямых взаимосвязей между увеличением толщины гарнисажа и изменений в дутьевых и газодинамических условиях ведения доменной плавки на ДП № 2 выявлено не было. На ДП №4 такие взаимосвязи были выявлены.

Сохранность футеровки в шахте ДП № 2 обеспечило стабильность тепловых нагрузок в течение всего года эксплуатации с момента задувки печи. На ДП № 4 за 6 месяцев, по мере разгара футеровки, тепловые потери в системе испарительного охлаждения шахты увеличились в ~8 раз (рис. 8).

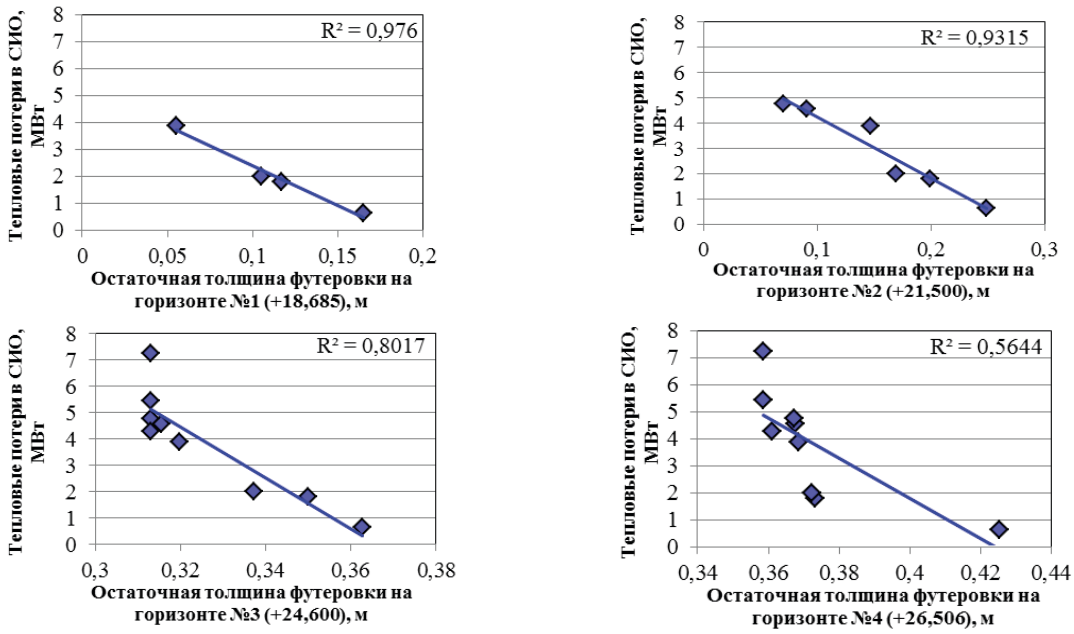
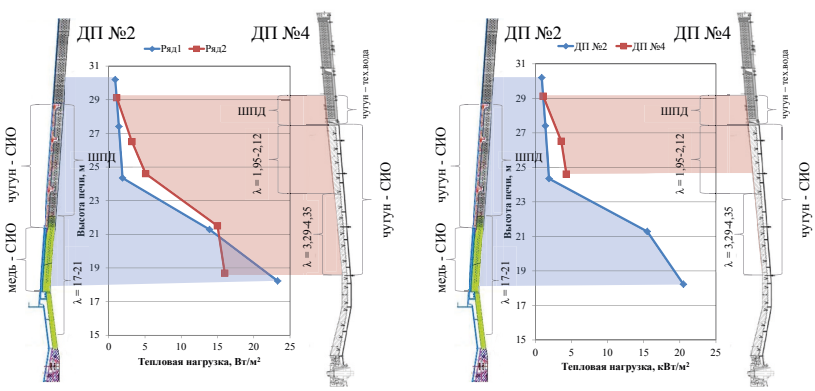


Рис. 8. Взаимосвязь разгара футеровки с тепловыми потерями в системе испарительного охлаждения ДП №4 в течение первых 6 месяцев ее эксплуатации после задувки

В первые месяцы эксплуатации ДП № 2 тепловые нагрузки на нижних горизонтах шахты превышали ДП № 4. Это объясняется тем, что на ДП № 2 применяются медные холодильные плиты и более теплопроводный материал футеровки. В дальнейшем, вследствие разгара футеровки, тепловые нагрузки на второй отметке контроля ДП № 4 (+21,000 м) уже через 4 месяца после задувки превысили на соответствующей высоте тепловые нагрузки ДП №2 внизу и середине шахты. На охлаждаемой технической водой верхней части шахты ДП № 4 и неохлаждаемой части ДП № 2 присутствовали сопоставимые тепловые нагрузки 2÷5 кВт/м^2 (рис. 9).



4 месяца от задувки *12 месяцев от задувки*

Рис. 9. Сравнение средних тепловых нагрузок на футеровку и холодильники по высоте шахт ДП №2 и ДП №4 ПАО «Запорожсталь» за первые 4 и 12 месяцев их эксплуатации от задувки после капитальных ремонтов

Вследствие разгара футеровки ДП № 4, достигшего 74% (95 м^3 огнеупорного бетона) за первые 12 месяцев эксплуатации печи, тепловые потери в системе охлаждения шахты увеличились с 1,5 до 7,5 МВт (рис. 10).

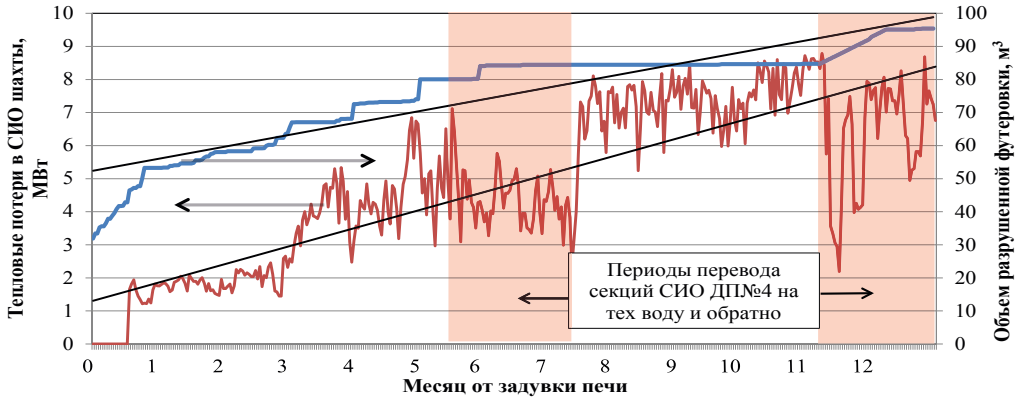


Рис. 10. Влияние разгара футеровки на увеличение тепловых потерь в СИО ДП №4 за первые 12 месяцев их эксплуатации от задувки после капитальных ремонтов

Сравнение объемов выработки пара в СИО ДП №4 и ДП №2 показало, что, вследствие применения высокотеплопроводной футеровки и медных холодильных плит, выработка пара на ДП №2 в первые 3 месяца после задувки превышала выработку пара в СИО ДП №4 на 3 т/час, а тепловые потери — на 2 МВт (рис. 11). Однако, в дальнейшем, после увеличения степени разгара футеровки на ДП №4, выработка пара в СИО и тепловые потери шахты ДП №4 значительно превысили выработку пара СИО и тепловые потери шахты ДП №2.

Через 3 месяца эксплуатации ДП №2 тепловые потери и выработка пара в СИО уменьшились в 2–3 раза вследствие образования в шахте защитного низкотеплопроводного гарнисажа (рис. 11).

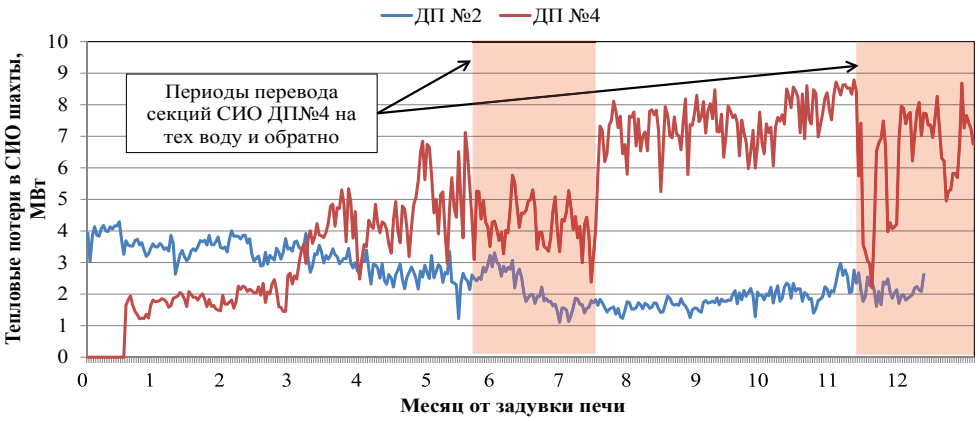


Рис. 11. Сопоставление динамики изменения тепловых потерь в СИО шахт ДП №2 и ДП №4 ПАО «Запорожсталь» за первые 12 месяцев их эксплуатации от задувки после капитальных ремонтов

Увеличение тепловых потерь в СИО ДП № 4 по мере износа футеровки привело к существенно большему расходу кокса, на ~12 кг/т чугуна, в сравнении с ДП № 2 (рис. 12). В июне 2016 года разница в расходе кокса на покрытие тепловых потерь составляла 27 кг/т чугуна (ДП № 2 – 15 кг/т; ДП № 4 — 42 кг/т).

Износ футеровки и увеличение тепловых потерь в системе охлаждения ДП № 4 повлияли на ухудшение ее технико-экономических показателей работы в сравнении с ДП №2 (табл. 2). Расход кокса в среднем за двенадцать первых месяцев от задувки ДП № 4 больше чем на ДП № 2 на 9 кг/т, расход суммарного топлива больше на 24 кг/т чугуна.

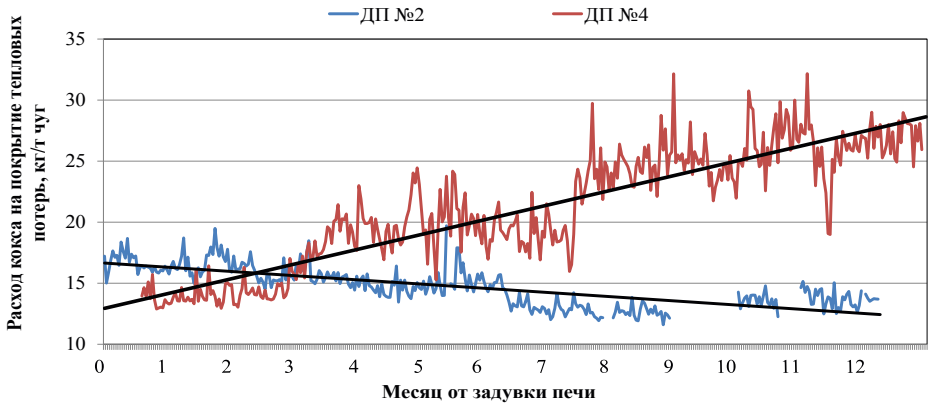


Рис. 12. Сопоставление расхода кокса на покрытие тепловых потерь в системах охлаждения ДП №2 и №4 за первые 12 месяцев их эксплуатации от задувки после капитальных ремонтов

Таблица 2. Сравнение расхода кокса и ПУТ на ДП №4 и ДП №2 за первые 12 месяцев их эксплуатации от задувки.

Месяц от раздувки после ремонта	ДП-2				ДП-4			
	кокс	ПУТ	Суммарное топливо	Условное топливо	кокс	ПУТ	Суммарное топливо	Условное топливо
	кг/т чугуна				кг/т чугуна			
3	365	148	513	514	356	161	517	519
4	356	154	528	511	372	148	522	521
5	361	150	510	512	410	135	556	545
6	355	145	500	501	404	132	536	536
7	379	127	506	506	377	161	538	539
8	376	119	495	495	378	173	551	553
9	367	137	504	505	367	174	541	543
10	364	143	507	508	355	170	525	527
11	364	152	516	517	355	171	526	528
12	363	150	513	514	364	168	532	534
Средняя величина за 12 месяцев	365	143	510	509	374	159	534	534

ВЫВОДЫ

1. Переход на технологию вдувания пылеугольного топлива уменьшает ресурс работы футеровки и систем охлаждения доменных печей в традиционном исполнении. Для работы доменной печи с применением ПУТ требуется особый подход к выбору конструкции системы охлаждения, холодильников, футеровки и профиля печи, автоматизированные средства контроля теплового и газодинамического состояния печи.
2. На ДП № 2 ПАО «Запорожсталь», для эффективной работы с ПУТ, были впервые в Украине применены новые решения с установкой в шахте двух рядов вертикальных медных холодильных плит и футеровки из карбидокремниевого огнеупора.
3. Экономический эффект от применения новой конструкции шахты ДП №2, в сравнении с ДП № 4, где использовались традиционные решения для технологии работы с природным газом, состав-

ляет в среднем ~18 кг экономии кокса на тонне выплавленного чугуна в течение 2 лет от задувки печей до остановки ДП №4 на капитальный ремонт второго разряда с модернизацией системы охлаждения и футеровки шахты.

4. Разработанные ИЧМ НАНУ и реализованные на ДП № 2 и ДП № 4 системы непрерывного автоматизированного контроля тепловой работы и разгара футеровки шахты (САК «Шахта») и системы автоматизированного контроля внешних тепловых потерь печи и расхода кокса на их покрытие позволили проанализировать влияние конструкции ДП № 2 и ДП № 4, технологического режима плавки на разгар футеровки, тепловые потери и расход кокса на их покрытие.
5. На ДП № 2, в отличие от ДП №4, не выявлены взаимосвязи разрушения футеровки с увеличением расхода ПУТ и дутьевым режимом. Износ футеровки из торкретбетона шахты ДП № 4, как минимум, в 10 раз превысил износ футеровки ДП № 2 из карбидкремневого огнеупора.
6. Сочетание медных холодильников и рациональной толщины футеровки на ДП №2 позволило создать условия для умеренного отвода теплоты и формирования стабильного гарнисажного покрытия толщиной от 38 до 195 мм.
7. На нижних горизонтах шахты ДП № 2 и ДП № 4 прослеживается уменьшение толщины гарнисажа с увеличением расхода ПУТ. Наибольшее влияние на уменьшение толщины гарнисажа по всей высоте шахты оказывает применение сварочного шлака.
8. Увеличение тепловых потерь в СИО ДП № 4 по мере износа ее футеровки привело к существенно большему, в сравнении с ДП № 2, удельному расходу кокса: на 12 кг/т чугуна (за первый год ее эксплуатации) и на 27 кг/т чугуна (за второй год).

Список литературы

1. Влияние режима работы доменной печи № 4 ПАО «Запорожсталь» с применением пылеугольного топлива на разгар футеровки и тепловую работу периферийной зоны / А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, А.А. Сохацкий, К.С. Цюпа, С.В. Гоман, А.П. Фоменко / Экология и промышленность, 2015 г. № 4. С. 53–62.
2. Системная надежность доменного производства с использованием пылеугольного топлива / В.И. Большаков, А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, А.А. Сохацкий, К.С. Цюпа, Б.В. Корнилов // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2015. — № 7. — С. 22–30.
3. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива в доменном производстве Украины / В.И. Большаков, А.Л Чайка, В.В. Лебедь, А.А. Сохацкий // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2015. — № 2. — С. 6–11.
4. Тепловая работа и перспективные конструкции шахты и металлоприемника доменной печи при применении пылеугольного топлива / В.И. Большаков, А.В. Бородулин, А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, А.А. Сохацкий, Г.В. Панчоха // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2014. — № 3. — С. 106–110.
5. Освоение работы доменной печи, полезным объемом 3000 м^3, с применением пылеугольного топлива / В.И. Большаков, А.Л Чайка, В.В. Лебедь и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2012. — № 4. — С. 36–40.

А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, ИЧМ НАН Украины

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В УКРАИНЕ

ВВЕДЕНИЕ

Первые в мире опыты по вдуванию пылеугольного топлива (ПУТ) в доменную печь были проведены в 1948 году на доменной печи объемом 427 м^3 завода им.Дзержинского в УССР, позднее — в США и Западяной Европе. Первая в Украине промышленная установка для вдувания ПУТ в горн доменной печи объемом 1300 м^3 была построена на заводе «Запорожсталь» в 1966 году по технологическому заданию ИЧМ и проекту Укргипромеза. С 1980 г. в металлургии Украины ПУТ применялось на печах малого объема Донецкого металлургического завода («ДМЗ»), оснащенных конусными загрузочными устройствами [1, 2]. Опыт применения ПУТ на малых печах «ДМЗ» не позволяет перенести его на современные доменные печи объемом 1500–5000 м^3, в том числе на печи, оснащенные бесконусными загрузочными устройствами (БЗУ).

В последние годы, из–за высокой цены природного газа и его дефицита, металлургические предприятия Украины переходят от технологии работы с природным газом к технологии доменной плавки с вдуванием ПУТ: ПАО «Алчевский металлургический комбинат» («АМК») — с 2009 года, ПАО «Запорожсталь» — с 2011 года, ЧАО «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича» («ММК им. Ильича») — с 2012 года, ПАО «Днепровский металлургический комбинат им. Дзержинского» («ДМКД») — с 2014 года, ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» («АМКР») и ЧАО «Енакиевский металлургический завод» («ЕМЗ») — с 2016 года, ЧАО «МК «Азовсталь» — с 2017 года.

Доменное производство столкнулось с организационными (качество сырья, технология) и техническими (уменьшение ресурса работы доменной печи и обслуживающих ее агрегатов) трудностями, которые уменьшают эффективность применения технологии ПУТ в Украине в сравнении с зарубежной практикой. Переход доменного производства на технологию работы с ПУТ приводит к кардинальным изменениям в энергетическом и сырьевом балансах комбината. Однако, поскольку технологическая схема маршрута конвертерного производства железоуглеродистого полупродукта осталась прежней, это уменьшает эффект от применения ПУТ в доменном производстве из-за сохранившихся жестких требований сталеплавильщиков к химическому составу чугуна и его температуре [1–10].

При переходе доменных печей Украины на технологию плавки с ПУТ изменились условия образования гарнисажа, восстановительной и тепловой работы газового потока, качество и химический состав топлива, что повлияло как на технологию ведения доменной плавки, так и на ее технико-экономические показатели и ресурс работы печей. Значительно уменьшился ресурс работы заплечиков и низа шахты печи, что снижает продолжительность кампании печи и является одной из главных причин ухудшения технико-экономических показателей доменной плавки и эффективности этой технологии на доменных печах Украины в сравнении с передовой мировой практикой [1–9].

Отличия в качестве кокса, железорудного сырья и углей для приготовления ПУТ, особенностях конструкции и технической оснащенности доменных печей Украины, в сравнении с зарубежными, требуют внедрения комплексных ресурсо- и энергосберегающих мероприятий, проведения научных исследований для изучения особенностей технологии и увеличения эффективности применения пылеугольного топлива.

ПОКАЗАТЕЛИ И ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАВКИ С ПУТ

На основе результатов анализа отечественного и зарубежного опыта применения ПУТ на доменных печах, результатов исследований, выполненных специалистами ИЧМ на ПАО «АМК», ЧАО «ММК им. Ильича», ПАО «Запорожсталь», определены научно-практические направления увеличения эффективности освоения технологии доменной плавки с ПУТ в Украине (рис. 1–3).

На рисунках 1–3 приведены отличия в показателях тепловой работы, дутьевом и газодинамическом режиме, в выходе и основности шлака, содержании кремния и серы в чугуне доменных печей ПАО «АМК», ЧАО «ММК им. Ильича» и ПАО «Запорожсталь» при увеличении расхода ПУТ в сравнении с передовой зарубежной практикой.

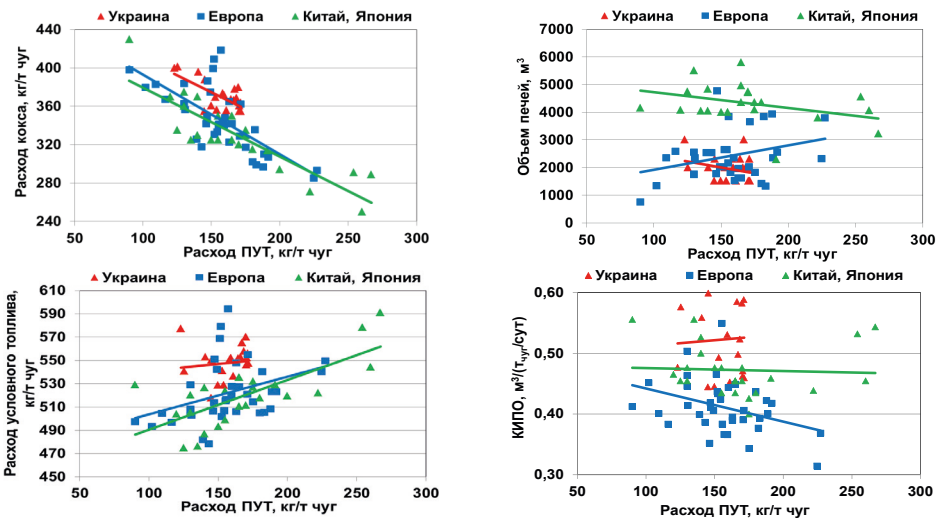


Рис. 1. Сопоставление с зарубежной практикой полезного объема печей и лучших показателей работы с ПУТ доменных печей ПАО «Запорожсталь», ЧАО «ММК им. Ильича» и ПАО «АМК»

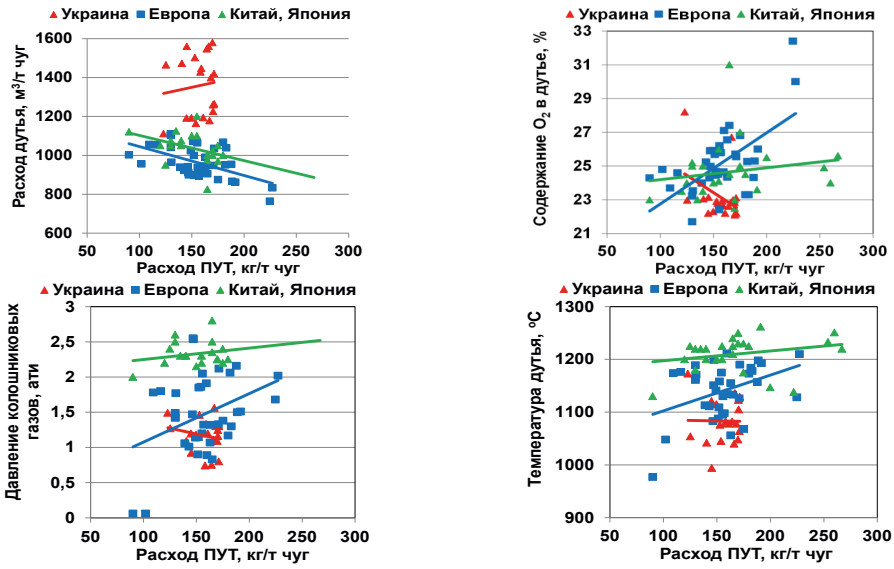


Рис. 2. Отличия от зарубежной практики в дутьевом и газодинамическом режимах работы доменных печей ПАО «АМК», ЧАО «ММК им. Ильича» и ПАО «Запорожсталь» при увеличении расхода ПУТ

Расход кокса и условного топлива на доменных печах Украины в сравнении с зарубежной практикой больше на ~40 кг/т чугуна, а удельная производительность на 1 м³ полезного объема меньше в среднем на 20% при сопоставимом удельном расходе ПУТ (рис. 1).

С увеличением расхода ПУТ рациональными мероприятиями являются увеличение расхода кислорода, давления под колошником, температуры дутья, уменьшение удельного расхода дутья на тонну чугуна. На большинстве доменных печей Украины в силу недостаточной мощности воздуходувных машин и надежности конструкции элементов охлаждения шахты, заплечиков и фурм данный подход не применяется (рис. 2).

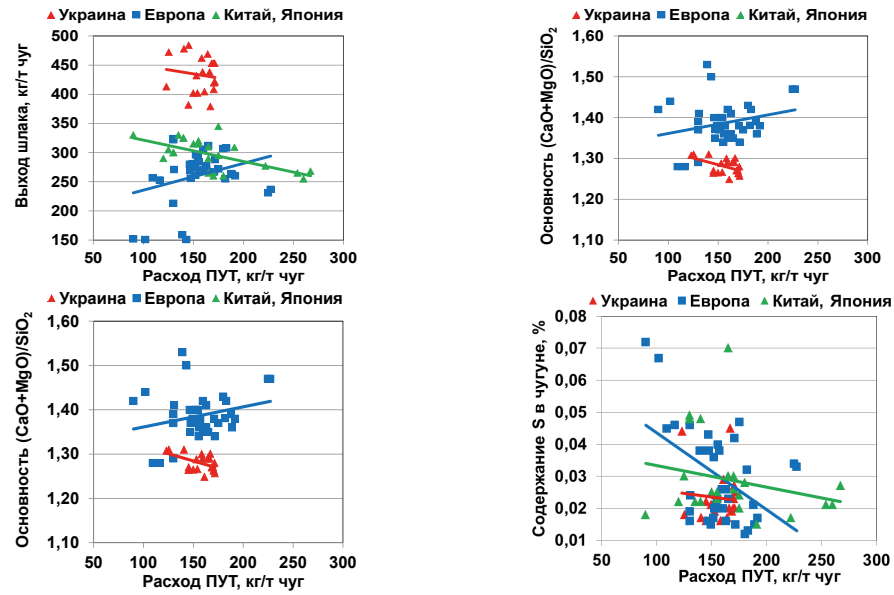


Рис. 3. Отличия от зарубежной практики по выходу и основности шлака, содержанию кремния и серы в чугуне доменных печей ПАО «АМК», ЧАО «ММК им. Ильича» и ПАО «Запорожсталь» при увеличении расхода ПУТ

При переходе на технологию работы с ПУТ необходимо улучшить качество шихты и изменить требования к содержанию кремния и серы в чугуне, что является дальнейшей перспективой (рис. 3).

Результаты исследований показали, что наиболее целесообразный путь уменьшения энергетических и других производственных затрат состоит в строительстве доменных печей большого объема, оснащенных современными бесконусными загрузочными устройствами, системами охлаждения, огнеупорами, средствами контроля тепловой работы, современным оборудованием для вдувания ПУТ и воздуходувными машинами, улучшение качества шихтовых материалов и совершенствования технологии доменной плавки во взаимосвязи с другими переделами.

Применительно к условиям работы конкретного металлургического комбината необходимо разрабатывать требования и направления реализации ресурсо- и энергосберегающей работы доменных печей с применением пылеугольного топлива:

- модернизация конструкции и системы охлаждения, изменение профиля печей;
- улучшение шихтовых условий для доменного производства;
- применение БЗУ;
- увеличение мощности воздуходувных машин;
- совершенствование технологии доменной плавки;
- изменение требований по содержанию кремния и серы в чугуне за счет совершенствования маршрута производства стали «доменная печь — кислородный конвертер»;
- внедрение систем автоматизированного контроля разгара футеровки и образования гарнисажа, тепловых нагрузок, тепловых потерь в системе охлаждения и расхода кокса на их покрытие;
- оснащение доменной печи средствами контроля распределения шихты и газового потока (в первую очередь, автоматизированной системой отбора радиального газа с масс-спектральным газоанализатором).

РЕСУРС РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И КОНСТРУКЦИЯ ИХ ПРОФИЛЯ

Основными отличительными особенностями типовой конструкции доменных печей постсоветского пространства для выплавки передельного чугуна с применением природного газа являются (рис. 4):

- конструкция с опорным кольцом (маратором), на который опирается шахта и верх печи;
- вертикальные чугунные холодильники в заплечиках и до середины шахты;
- отсутствие охлаждения печи от середины шахты до колошника;
- футеровка шахты опирается на выступы «L»-образных холодильных плит;
- распар формируется футеровкой, а не вертикальной холодильной плитой;
- заплечики и шахта охлаждаются СИО (за исключением ДП №9 ПАО «АМКР» объемом 5000 м^3, где заплечики и низ шахты охлаждаются технической водой из–за увеличения объема печи и увеличения тепловых нагрузок).

Конструкция доменной печи для работы с природным газом обеспечивала в среднем 10–15-летнюю кампанию, без применения дорогостоящих медных холодильников, и обеспечивала эффективное использование восстановительного потенциала природного газа за счет более «вытянутого» вверх и узкого в распаре профиля печи в сравнении с зарубежными конструкциями печи для ПУТ (рис. 5).

При переходе доменного производства Украины на технологию плавки с ПУТ в 2–3 раза уменьшился ресурс работы заплечиков и низа шахты печи, что снизило продолжительность кампании печи и стало одной из причин ухудшения технико–экономических показателей доменной плавки и эффективности этой технологии на доменных печах Украины в сравнении с передовой мировой практикой [1–8] (рис. 6).

Результаты выполненных исследований показали, что причинами уменьшения ресурса работы шахты доменных печей Украины при освоении технологии доменной плавки с ПУТ являются:

- локальное увеличение и нестабильное «пульсирование» тепловых нагрузок в районе заплечиков, распара и низа шахты;
- увеличение производства и степени прямого восстановления железа;

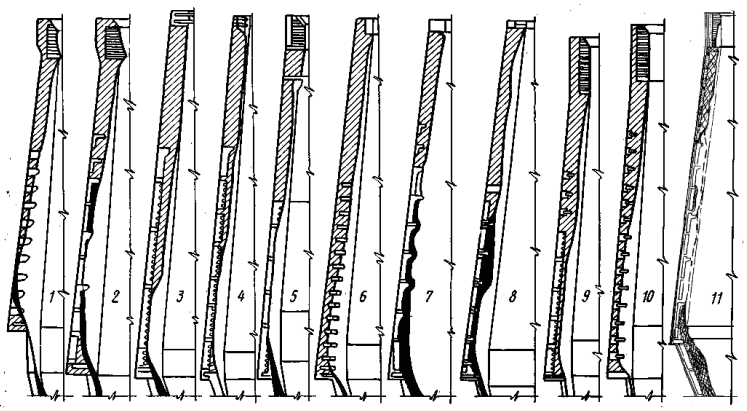


Рис.4. Конструкции и профили выдутых доменных печей, работавших с природным газом: 1, 2 – ММК, 1370 м³; 3, 4 – ЗСМК, 2000 и 3000 м³; 5 – КМК, 1462 м³; 6 – КарМК, 1719 м³; 7 – НЛМК, 2000 м³; 8 – ЧерМК, 2700 м³; 9, 10 – ДМК им. Дзержинского, 1386 м³; 11 – АМКР, 5000 м³, 2003 г.

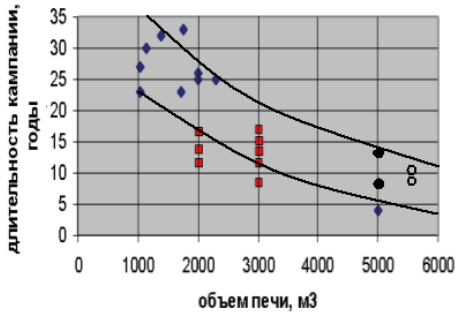


Рис. 5. Длительность кампании доменных печей Украины и России с природным газом

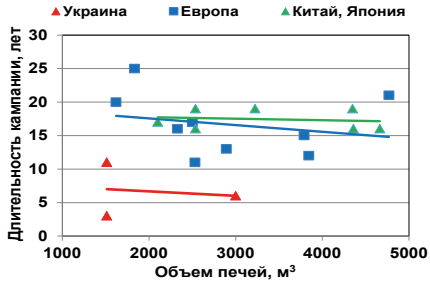


Рис.6. Длительность кампании доменных печей с ПУТ

- увеличение количества первичного шлака и содержание в нем монооксида железа, уменьшение основности шлака;
- неэффективная конструкция холодильников;
- неэффективность имеющихся средств управления радиальным распределением газового потока.

Современная конструкция доменной печи, предназначенная для работы с ПУТ, способна обеспечить в среднем 15-летнюю кампанию и максимальное количество вдувания ПУТ за счет более «бочкообразного» профиля печи с меньшим углом наклона заплечиков, большим диаметром распара и колошника, меньшей высотой шахты и углом ее наклона, в сравнении с конструкцией печи сопоставимого объема для работы с природным газом (рис. 6).

Основными отличительными особенностями современных конструкций зарубежных доменных печей, работающих с пылеугольным топливом (рис. 7), в сравнении с доменными печами Украины, являются:

- конструкция печи с самонесущим кожухом;
- вертикальные (предварительно футерованные) или горизонтальные медные холодильники в заплечиках и до середины шахты;
- с середины шахты и до колошника печь охлаждается вертикальными, предварительно футерованными, чугунными холодильными плитами, преимущественно, без «L»-образных выступов от которых отказываются при строительстве новых печей;
- распар формируют вертикальной холодильной плитой;
- заплечики и шахта охлаждаются «холодной» химически очищенной водой.

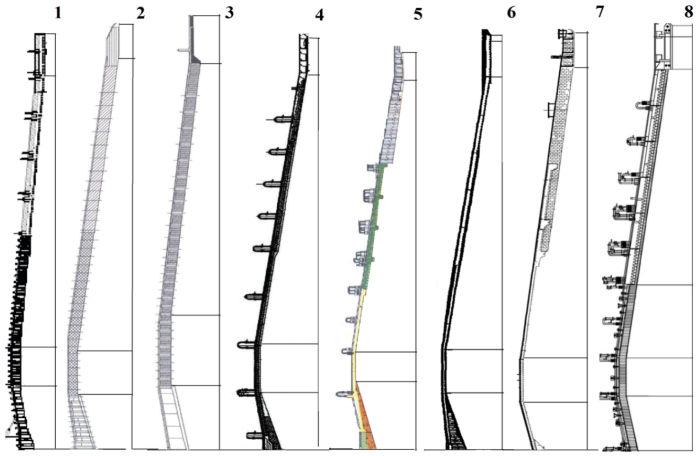


Рис. 7. Конструкция профиля зарубежных доменных печей, работающих с ПУТ: 1 — Ijmuiden, № 7; 2, 3 — Salzgitter, A, C; 4, 5 — Rogesa Dillingen, № 4, 5; 6 — Lulea, № 3; 7 — Linz, A; 8 — Китай

В качестве направлений увеличения ресурса работы шахты доменных печей Украины и России при освоении технологии доменной плавки с ПУТ предлагается:

1. Изменение конструкции и профиля печи: увеличение диаметра распара, уменьшение угла наклона заплечиков, изменение высоты заплечиков, распара и шахты;
2. Применение химически очищенной воды в системе охлаждения;
3. Применение медных, стальных и других предварительно футерованных холодильников с высокой теплоотводящей способностью в заплечиках и шахте;
4. При капитальных ремонтах 1-го и расширенного 2-го разряда преимущественно использовать современную штучную футеровку в шахте, а не огнеупорный бетон;
5. Установка автоматизированных систем контроля тепловой работы и разгара футеровки;
6. Формирование осевого распределения газового потока;
7. Использование углей для ПУТ с минимальным содержанием золы;
8. Выбор рационального дутьевого, газодинамического, шлакового и режима загрузки печи;
9. Модернизация и совершенствование средств контроля и управления радиальным распределением, восстановительной и тепловой работой газового потока и сжигания ПУТ.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ И РАЗГАРА ШАХТЫ И МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА

Тепловые нагрузки на систему охлаждения печи являются интегральным параметром, который зависит от конструкции печи и технологии ведения доменной плавки [1–12].

Особенно актуальным вопрос о необходимости реализации на доменных печах Украины средств автоматизированного контроля тепловой работы периферийной зоны доменной печи стал при

освоении технологии доменной плавки с ПУТ и поиска рациональных решений по увеличению ресурса работы печей [1–9].

На сегодняшний день в Украине системы автоматизированного контроля тепловой работы и разгара шахты и горна, тепловых потерь в системе охлаждения печи и расхода кокса на их покрытие реализованы на ДП №4 и ДП №2 ПАО «Запорожсталь», частично реализованы на ДП № 9 ПАО «АМКР» (отсутствует система контроля разгара шахты). В основе этих автоматизированных систем лежат разработки ИЧМ НАНУ (рис. 8).

Информация, полученная от системы автоматизированного контроля, позволяет определять «слабые» места в конструкции и системе охлаждения шахты и научно-обоснованно выбирать способ их устранения при проведении капитальных ремонтов 1-ого и 2-ого разрядов.

Экономический эффект достигается за счет своевременного определения и уменьшения рисков увеличения тепловых потерь в системе охлаждения, преждевременного износа системы водяного охлаждения, прогара холодильников шахты, попадания воды в печь, простоев и тихого хода печи и, как следствие, возрастание рисков, которые связаны с увеличением расхода кокса, уменьшением производства и уменьшением длительности кампании печи.

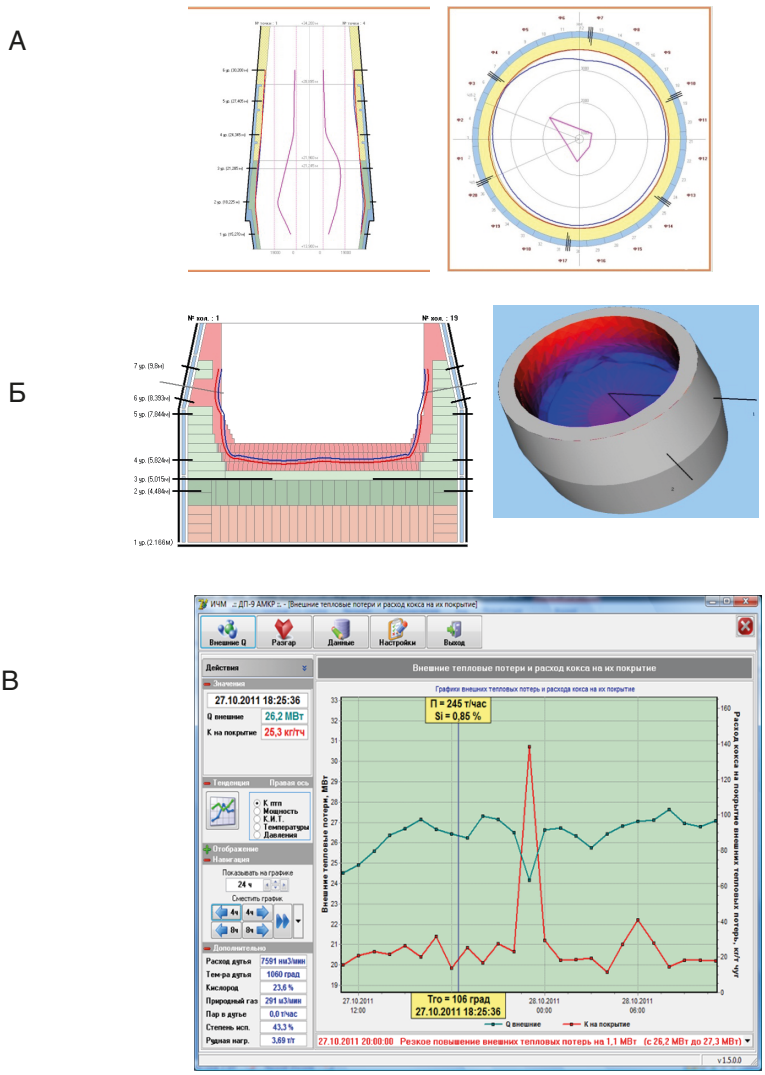


Рис.8. Видеокадры систем автоматизированного контроля разгара шахты (А), металлоприемника (Б), тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие (В)

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГРУЗКИ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ПУТ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОВ И ШИХТЫ

Основными факторами, осложняющими условия плавки с ПУТ, на которые можно эффективно влиять распределением шихтовых материалов на колошнике, являются [1–2]:

- значительное увеличение средней рудной нагрузки и, как следствие, уменьшение газопроницаемости столба шихты;
- уменьшение высоты слоев кокса, вплоть до их локального отсутствия между железорудными материалами, и высокая неравномерность распределения объемов;
- уменьшение гибкости управления распределением материалов на колошнике;
- сложности в организации стабильного осевого газового потока.

Для улучшения показателей работы доменной печи с применением ПУТ необходимо реализовывать современные решения в технологии загрузки с применением ПУТ:

- оснащение доменной печи современным бесконусным загрузочным устройством (БЗУ) с функциональной системой его управления;
- формирование рациональной структуры слоев шихты — высота слоя кокса на колошнике около 0,5 м;
- загрузка осевого кокса [7, 12] (рис. 9);
- выбор параметров режима загрузки на основе информации современных средств контроля распределения шихты и газового потока.

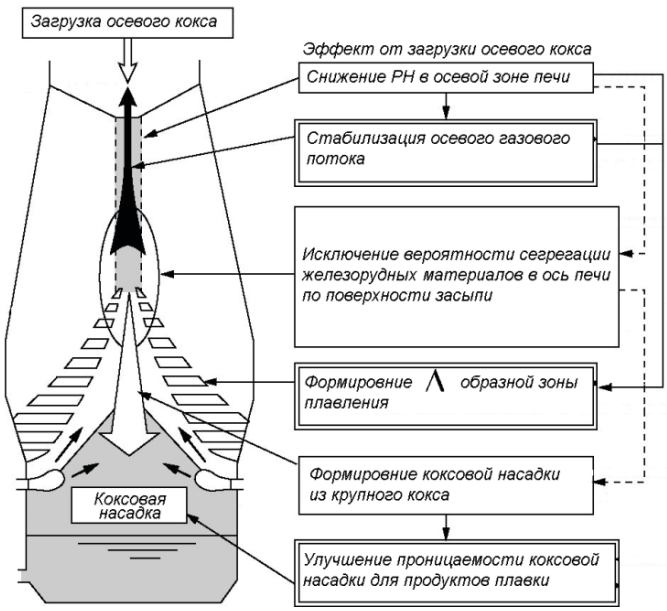


Рис. 9. Схема формирования рационального распределения газового потока при работе с применением ПУТ [12]

В настоящее время на многих доменных печах Украины и России не уделяется должного внимания обеспечению рациональной высоты слоев шихтовых материалов в доменной печи. Зарубежные специалисты ориентируются на высоту слоев кокса в распаре: в Нидерландах — не менее 0,14 м, в Японии — не менее 0,18 м [13]. Отечественный опыт ориентирован на высоту слоев кокса на колошнике. По исследованиям ИЧМ НАНУ, рациональные значения средней высоты находятся в диапазоне 0,40–0,55 м.

Для рационального управления и выбора режима загрузки, особенно с применением БЗУ, доменные печи необходимо оснащать современными средствами контроля распределения шихты и газового потока (табл. 1) [14–16].

Таблица 1. Преимущества и недостатки наиболее распространенных современных средств контроля распределения шихты и газового потока.

Средства контроля распределения шихты и газового потока	Преимущества	Недостатки
Машины отбора радиального газа с масс-спектрометрическими газоанализаторами	Возможность контроля химического состава газа по радиусу печи, точность измерений, надежность и быстродействие	Необходимость качественного технического обслуживания газоанализатора
Радиолокационные уровнемеры	Возможность осуществления непрерывного контроля уровня засыпи, точность показаний, простота монтажа	Чувствительность к запыленности
Инфракрасная камера	Возможность непрерывного визуального контроля характера газораспределения и технического состояния лоткового распределителя	Необходимость в постоянном охлаждении азотом, повышенные требования к качеству и периодичности обслуживания, низкая информативность в условиях загрузки пылеватой шихты
Профилемер	Возможность контроля распределения порций шихтовых материалов на колошнике работающей доменной печи	Погрешность измерения в условиях высокой запыленности, сложность конструкции, необходимость качественного и своевременного обслуживания
Термозонды (термобалки)	Возможность осуществления непрерывного контроля газораспределения на колошнике	Влияние на поток загружаемых материалов, отсутствие возможности эффективного контроля при загрузке горячего агломерата, зависимость показаний от уровня засыпи

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях применения традиционных технических, технологических и организационных решений в доменном производстве Украины переход на технологию с ПУТ оказался проблематичным и недостаточно эффективным в сравнении с зарубежной практикой.

Освоение технологии доменной плавки с применением ПУТ на металлургических предприятиях Украины и России требует комплексного рассмотрения и решения следующих задач:

- улучшение шихтовых условий;
- модернизация конструкции и системы охлаждения, изменение профиля печей;
- применение современных бесконусных загрузочных устройств;
- увеличение мощности воздуходувных машин;
- совершенствование технологии доменной плавки;
- оптимизация требований к качеству чугуна за счет совершенствования маршрута производства стали «доменная печь — кислородный конвертер»;
- внедрение систем автоматизированного контроля разгара футеровки и образования гарнисажа, тепловых нагрузок, тепловых потерь в системе охлаждения и расхода кокса на их покрытие;
- оснащение доменной печи современными надежными средствами контроля распределения шихты и газового потока.

Список литературы

1. Системная надежность доменного производства с использованием пылеугольного топлива / В.И. Большаков, А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, А.А. Сохацкий, К.С. Цюпа, Б.В. Корнилов // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2015. — № 7. — С. 22–30.
2. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива в доменном производстве Украины / В.И. Большаков, А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, А.А. Сохацкий // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2015. — № 2. — С. 6–11.
3. Освоение работы доменной печи полезным объемом 3000 м^3 с применением пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2012. — № 4. — С. 36–40.
4. Тепловая работа и перспективные конструкции шахты и металлоприемника доменной печи при применении пылеугольного топлива / В.И. Большаков, А.В. Бородулин, А.Л. Чайка и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2014. — № 3. — С. 106–110.
5. Влияние режима работы доменной печи №4 ОАО «Запорожсталь» с применением пылеугольного топлива на разгар футеровки и тепловую работу периферийной зоны / А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, А.А Жеребецкий, К.С. Цюпа, С.В. Гоман, А.П. Фоменко. // Научно производственный журнал «Экология и промышленность». — 2015. — №.4 — С. 53–61.
6. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива на доменных печах Украины / В.И. Большаков, А.Л. Чайка, В.В. Лебедь и др. // Металл и литье Украины. — 2013. — № 10. — С. 5–10.
7. Исследование влияния параметров отдушины на работу доменной печи с применением пылеугольного топлива / В.И. Большаков, В.В. Лебедь, А.А. Жеребецкий, А.Л. Чайка // Научно–производственный журнал «Экология и промышленность» — 2016. — № 2. — С. 54–61.
8. Влияние технологии применения пылеугольного топлива на показатели тепловой работы доменной печи, полезным объемом 3000 м^3 / В.И. Большаков, А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, А.А. Сохацкий, А.А. Жеребецкий, В.Н. Диментьев // Сборник тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». — 2014. — Вып. 29. — С. 31–40.
9. Влияния футеровки и системы охлаждения шахты на расход кокса и ресурс работы доменных печей ПАО «Запорожсталь» при применении пылеугольного топлива / А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, А.А. Сохацкий, К.С. Цюпа, С.В. Гоман, В.И. Набока, А.П. Фоменко В.Н. // «Черметинформация» Бюллетень «Черная металлургия» 2017. — № 1.
10. Эксергетический анализ энергоэффективности применения пылеугольного топлива в доменном производстве / В.И. Большаков, А.Л. Чайка, А.А. Москалина // «Экология и промышленность». — 2014. — №2. — С.87–94.
11. Пути повышения стойкости шахт доменных печей (по материалам межзаводской школы) / Шатлов В.А., Кутнер С.М., Солодков В.И. и др. // М.: Экспресс–информация. Ин-т «Черметинформация», 1981. — 36 с.
12. The Principle of Blast Furnace Operational Technology and Centralized Gas Flow by Center Coke Charging / Yoshiyuki Matsu, Koichiro Shibata, Yasuo Yoshida, Reiji Ono // Kobelco Technology Review, No. 26, Dec. 2006, p. 12–20.
13. М. Геердес, Р. Ченьо, И. Курунов, О. Лингарди, Д. Риккетс. Современный доменный процесс. Введение. — 3-е издание под ред. И.Ф.Курунова. / М.: Металлургиздат, 2016. 280 с.
14. Большаков В.И., Лебедь В.В. Современное состояние контроля газораспределения в доменной печи // В сб. научн. тр. ИЧМ «ФППЧМ». — Вып. 19. — 2009. — С. 67–80.
15. Большаков В.И., Лебедь В.В., Жеребецкий А.А. Использование современных средств контроля для управления радиальным распределением шихты в доменной печи // В сб. научн. тр. ИЧМ «ФППЧМ». — Вып. 21. — 2010. — С. 53–66.
16. Большаков В.И., Лебедь В.В., Жеребецкий А.А. Особенности управления загрузкой шихты на современных доменных печах // В сб. научн. тр. ИЧМ «ФППЧМ». — Вып. 25. — 2012. — С. 13–24.

А.Д. Зражевский, В.Н. Захарченко, ОП «Укрметаллургпром»

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВДУВАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ УКРАИНЫ

В период с 50-х и до середины 70-х годов прошлого столетия доменное производство СССР занимало передовые позиции в мировой металлургии. Украинскими учеными были впервые разработаны и нашли широкое применение новые технологии, направленные на интенсификацию выплавки чугуна и сокращение удельного расхода кокса. Впервые в мировой практике были созданы технологии, на сегодняшний день составляющие основу мировой металлургии. Например, ученые Украины доказали перспективность и преимущества строительства крупных доменных печей, вдувания ПУТ в доменные печи и др.

Однако, достижения наших предшественников остались в прошлом. Политические и, последовавшие за ними экономические коллизии 90-х годов, поставили перед промышленностью, в т.ч. и металлургической, новые задачи. Для обеспечения конкурентоспособности металлургической продукции необходимо снижение ее себестоимости при повышении качества. В доменном производстве на первый план вышли рост производительности агрегатов, снижение расхода кокса, отказ от использования природного газа и др. Технология вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) позволяет решить эти вопросы и украинские металлурги взяли курс на ее внедрение. Но, несмотря на то, что технология вдувания ПУТ была освоена еще в прошлом столетии, большее развитие она получила за рубежом. Наши проектные организации оказались не готовы предложить конструктивные решения по печи, ее зонам и участкам огнеупорам и системам охлаждения.

Отставание также было в научном обосновании выбора рациональных составов смесей по маркам углей, обеспечения их полного сжигания, технологических приемов распределения ЖРС и газа по сечению

печи. Особенно в обосновании теплотехнических процессов, охлаждающих элементах, стойкости огнеупоров, схем охлаждения и газоплотности многослойной структуры «футеровка—холодильник—зазор—бронь».

По этой причине к внедрению технологии были привлечены зарубежные фирмы вплоть до китайских.

Первыми реализовали инвестиционные проекты на предприятиях — Алчевском, «Запорожсталь», оборудование поставила фирма Кютнер, Мариупольский им. Ильича — китайской фирмой «Минметалз». В процессе эксплуатации кроме положительного эффекта, выразившегося в росте производительности доменных печей и снижении расхода кокса, выявились минусы. Минусы явились следствием того, что фирмы, выполнявшие проект и поставку оборудования, не привлекли к работе доменщиков технологов. В результате не были учтены качественные показатели сырья и кокса, и не были предложены соответствующие режимы ведения процесса. Так, содержание Fe в железорудной шихте на предприятиях Украины в тот период колеблется в пределах 54–56%, содержание фракции 0–5 мм — 14–21%. Качественные показатели кокса — S = 0,9–1,2%; CSR ~ 40%, CRI ~ 40%. В отдельных случаях имели место серьезные ошибки в проектных решениях, поломки оборудования.

При вдувании ПУТ из-за большой удельной поверхности вдуваемой пыли ее сгорание происходит с более высокой скоростью, чем кокса и вследствие этого сокращается окислительная зона.

Вдувание ПУТ приводит к снижению расхода кокса и повышению рудной нагрузки, а при этом снижается газодинамика слоя шихты. Газу сложнее проникать в центральную часть печи, увеличивается периферийное движение газов, что в свою очередь, способствует развитию высоких температур в зоне распара и заплечиков.

Охлаждающая же способность чугунных холодильников, поставленных на всех печах, переведенных на технологию вдувания ПУТ, меньше, чем медных. В результате чугунные холодильники и футеровка низа шахты, распара и заплечиков не обеспечивали отвод возросших более чем в 2 раза тепловых нагрузок, что привело к значительному сокращению срока службы этих участков печи, разрушению холодильников, пластической деформации и трещинам брони.

Разрушение холодильника приводит к разрыву охладительных труб и неконтролируемому попаданию воды в печь, что в свою очередь приводит к снижению нагрева продуктов плавки, перерасходу кокса. Кроме того, неэффективная система охлаждения не дает возможности наращивать устойчивый гарнисаж, который оползает в горн (доменной печи) снижая физический нагрев чугуна и шлака, разрушает воздушные фурмы и все это приводит к нарушению хода доменной плавки. Для наращивания гарнисажа на чугунных холодильниках необходимо 2–3 смены (16–24 часа), на медных — гарнисаж восстанавливается за 3–5 часов.

Результат всего вышеперечисленного – сокращение межремонтного периода.

Можно сделать вывод: технология вдувания ПУТ – это именно технология, а не установка оборудования помола и вдувания.

Необходимо в проектах реконструкции учитывать следующее:

— перевод охлаждения печи на химически очищенную воду;
— охлаждающие элементы: (фурмы медные, двухконтурные;
— амбразуры медные, охлаждаемые кадушки);
— медные холодильники – фурменная зона, заплечики, нижняя и средняя шахта;
— зонды над шихтой, в шихте, зонды давления и периферийного потока.

Необходимо также предусмотреть системы:

— диагностики остаточной толщины футеровки;
— предупреждения прогара фурм и попадания воды на футеровку;
— контроля наполнения – опорожнения горна;
— контроля работы системы охлаждения.

Необходимо обратить внимание на организацию процесса загрузки, обеспечивающего увеличение активной площади движения чугуна и шлака по сечению горна (уменьшение объема малоподвижных материалов за счет лоткового загрузочного устройства, подачи кокса в центр печи и др.).

И конечно не менее важным фактором является качество шихтовых материалов и кокса.

В настоящее время технология вдувания ПУТ внедрена на Днепровском МК (оборудование фирмы Пауль Вюрт), освоение технологии осуществляется в доменных цехах «АрселорМиттал Кривой Рог» (ДП-9, по контракту с фирмой Даниэли Корус) и Енакиевского метзавода (оборудование фирмы Кютнер). Планируется внедрение на МК «Азовсталь» и «Евраз-ДМЗ». Следует отметить, что Объединение «Укрметаллургпром» регулярно (2 раза в год) проводит международные конференции доменщиков. По результатам обмена опытом проектирование на этих предприятиях велось с учётом описанных проблем, а значит, внедрение технологии и эксплуатация оборудования будут успешными.

Заслуживает внимания разработанная специалистами «ЕВРАЗ-ДМЗ» технология без подачи газа и вдувания ПУТ. При этом не уменьшился уровень производства и не увеличился удельный расход кокса.

Дальнейшее развитие и реализация технологии ПУТ с целью снижения себестоимости продукции должно сопровождаться не только строительством установок по вдуванию ПУТ и резким повышением качества железорудного сырья и металлургического кокса, модернизацией основных фондов, но и серьезным совершенствованием технологии доменной плавки.

Для этого необходимо активизировать новые разработки и обеспечить их реализацию на доменных печах Украины. Необходима разработка программы технического перевооружения отрасли, в основе которой должен лежать объективный анализ инновационного уровня производства в черной металлургии Украины как составной части мирового производства металлопродукции.

Рейнуд Ван Лаар, Виктор Ван Страатен, «Danieli Corus»
СОВРЕМЕННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ — МОДУЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО 178

В.Н. Панин, ГП «Укргипромез»
ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ДП № 4 МЕТКОМБИНАТА «ЗАПОРОЖСТАЛЬ» 190

Г.И. Алымов, ЧАО «Днепрогидромаш»
КОМПАНИЯ «ДНЕПРОГИДРОМАШ» — 20 ЛЕТ РАБОТАЕТ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГОВ 199

Э.А. Вислогузова, Л. Фолько, Р.А. Чеглов, Д. Палмизано, «Seven Refractories»
ВИДЕНИЕ ОГНЕУПОРНОЙ ФУТЕРОВКИ В ЗАПЛЕЧИКАХ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ 208

Е. А. Кондратьев, В. В. Горбунов, Богдановичское ОАО «Огнеупоры»
ПРОДУКЦИЯ БОГДАНОВИЧСКОГО ОАО «ОГНЕУПОРЫ» ДЛЯ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА 211

А.Ю. Глазер, ООО «ГЕА Процессный инжиниринг»
ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ GEA ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА ПРОМЫШЛЕННЫМИ ВЫБРОСАМИ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ 215

Ю.И. Цыгулев, ООО «Технология-М»
СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВДУВАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА 220

Раздел IV
ОБОРУДОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИИ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

М.Е. Аксюшин, М.Э. Калугин, Э.Н. Рябов, ЗАО «Калугин»
СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ДОМЕННЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ 228

Петер Клут, Вутер Эвальтс, Робин Хинк, Эдо Энгель, «Danieli Corus»
ПОСЛЕДНИЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИИ СУХОЙ И МОКРОЙ ОЧИСТКИ ДОМЕННОГО ГАЗА..... 236

Бумади Наджи, Руле Фредерик, Алэн Журдан, Мурье Миколе, Рори Макналли, «Saint Gobain»
КЕРАМИЧЕСКИЙ СТАКАН SAINT GOBAIN: ОБНОВЛЕНИЕ 244

Макото Гото, «Nippon Steel & Sumikin Engineering»
ДОЛГОВЕЧНЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ МЕДНЫЕ ХОЛОДИЛЬНИКИ, РАЗРАБОТАННЫЕ НИППОН СТИЛ И СУМИКИН ИНЖИНИРИНГ 257

Л.А. Вайсберг, А.Н. Коровников, В.А. Трофимов, ЗАО НПК «Механобр-техника»
МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМ ШИХТОПОДАЧИ ДОМЕННЫХ ЦЕХОВ..... 265

Юй Гохуа, Чжан Сянго, Ван бин, «Ansteel Group Corporation»
ИННОВАЦИЯ И ПРАКТИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ № 3 ОБЪЕМОМ 3200 М^3 ПАО «ЛАЙУСКАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ КОРПОРАЦИЯ» 270

Рейнуд Ван Лаар, Виктор Ван Страатен, «Danieli Corus»

СОВРЕМЕННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ — МОДУЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

АННОТАЦИЯ

В данном документе производится сравнение результатов двух современных конструкций доменных печей. Данные конструкции имеют схожие горны, верхнюю шахту и защиту колошника, но имеют разную футеровку заплечиков, пояса и шахты. Первая конструкция имеет медные горизонтальные холодильники, графит и карбид кремния. Вторая конструкция имеет медные вертикальные холодильные плиты.

Результаты частичной смены футеровки с модульным строительством описаны для первой конструкции. Показано преимущество меньшего периода простоя при частичном капремонте заплечиков, пояса и шахты, который был выполнен за 40 дней. Полный капремонт может быть выполнен за 70 дней. Это сравнимо с периодом остановки для другой конструкции, где используются медные вертикальные холодильные плиты.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные конструкции доменных печей с использованием медных горизонтальных холодильных плит, графита и карбида кремния или медных вертикальных холодильников появились в промышленности в 1970-х и 1980-х. Основной задачей таких конструкций было обеспечить более продолжительный срок кампании и увеличить годовой ресурс работы. В настоящее время для новых

заводов требуемый срок составляет 15–20 лет до капремонта. Работы с низким расходом кокса и высокой производительностью ставят более сложные задачи. Ухудшение качества сырья приводит к увеличению объемов мелочи и шлака, что создает проблему для проникновения газа и увеличивает риск утечек воды. Распределение и газопроницаемость шихты являются наиболее важными факторами для производства с низкими затратами.

Длительность остановки для капремонта в последнее время также стала очень важной в связи с тем, что большинство заводов сегодня работают с меньшим количеством доменных печей в сравнении с тем, как это было раньше. Необходимо свести к минимуму потерю производительности во время капремонта и с 1990-х технология модульной организации капремонта применяется на многих заводах, использующих медные и чугунные вертикальные холодильные плиты.

За последние 10 лет на многих заводах наблюдается катастрофический износ медных вертикальных холодильников, что снижает рабочее время, производительность и продолжительность кампании на этих заводах. Медные горизонтальные холодильники, графит и карбид кремния великолепно себя зарекомендовали на всех заводах, где использовалась оригинальная конструкция ‘Hoogovens’. Длительность капремонта при использовании технологии Hoogovens всегда была больше в связи с тем фактом, что установка огнеупоров могла быть выполнена только после установки кожуха, а медные вертикальные холодильники предварительно монтировались на кожухе. Этот относительный недостаток был недавно исправлен с разработкой технологии модульного выполнения капремонта, которая включила в себя технологию предварительного монтажа Hoogovens. Работы выполняются современными транспортными средствами и подъемными системами с большой грузоподъемностью с цифровым управлением и временными усиленными системами для модулей кожуха, включая медные горизонтальные холодильники и футеровку огнеупорами.

2. СОВРЕМЕННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Современные конструкции доменных печей включают в себя чугунные вертикальные холодильники в верхней части шахты и в зоне колошника. Типичный чугунный вертикальный холодильник и сопутствующая система охлаждения показаны на рис. 1. Стандартные решения для чугунных вертикальных холодильников включают в себя:

— Сильфонный компенсатор на выводах для минимального напряжения
— Изогнутый профиль для оптимального опускания шихты
— Вставки из карбида кремния для максимального сопротивления истиранию

Система охлаждения включает в себя системы управления рециркуляцией и температурой для максимального эффективности теплообмена в верхней части шахты и производительности доменной печи.

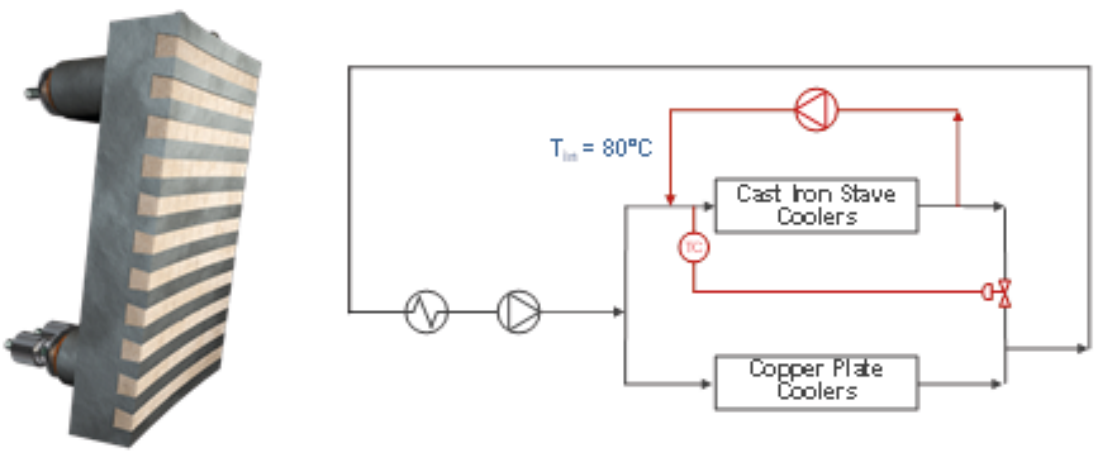


Рис. 1. Чугунный вертикальный холодильник защиты колошника и верхней шахты и система охлаждения.

Современная конструкция горна показана на рис. 2 и включает в себя микропористый углерод с высокой проводимостью, графит и рубашку охлаждения кожуха горна. Как альтернатива, охлаждение горна может быть выполнено с использованием чугунных и медных вертикальных холодильников.

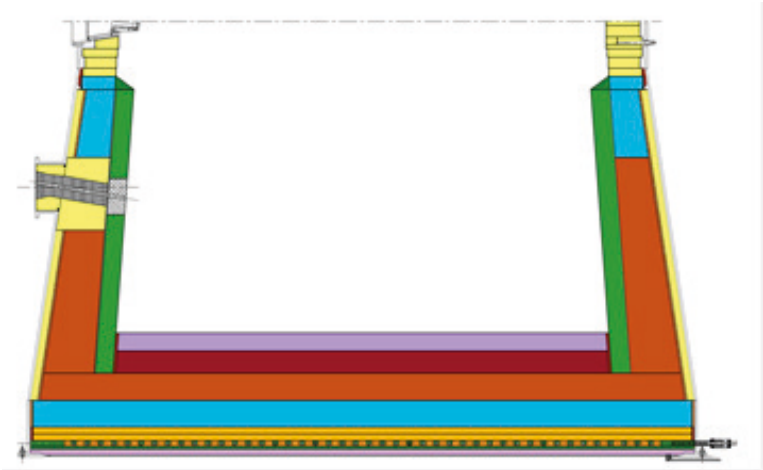


Рис. 2. Подина и горн

Хотя горн доменной печи, верхняя шахта и колошник являются важными участками, выбор технологии для заплечиков, пояса и нижней и средней шахты более важен для продолжительности кампании и надежности кампании. Кроме того, есть сильная зависимость между выбором технологии для данных участков и необходимой продолжительностью остановки для капремонта. Две современные конструкции, где используются чугунные вертикальные холодильные плиты в верхней шахте и защите колошника и вышеупомянутой конструкции горна показаны на рис. 3.

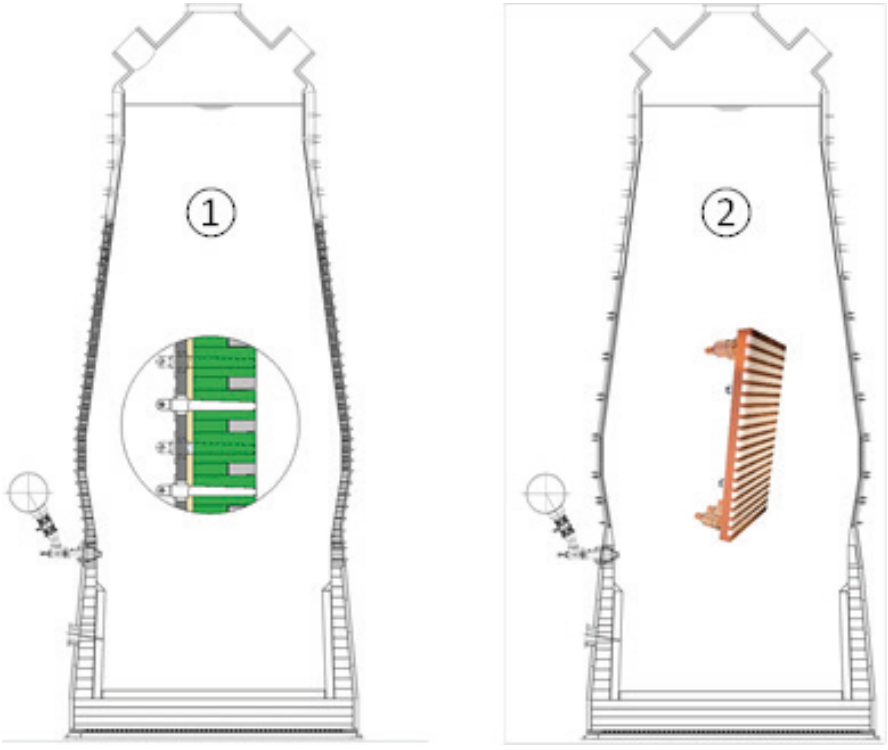


Рис. 3. Современные конструкции доменной печи

В первой конструкции показана технология Hoogovens с использованием медных горизонтальных холодильников, графита и карбида кремния. Во второй конструкции применяются обычные медные вертикальные холодильные плиты. Был проведен сравнительный анализ для сопоставления технических данных этих двух конструкций для большой доменной печи с диаметром горна 14 м, 40 фурм и дневной производительностью 10,000 тонн чугуна.

Диаграмма теоретической тепловой нагрузки показана на рис. 4 и не зависит от проекта футеровки. На диаграмме показаны средние дневные величины.

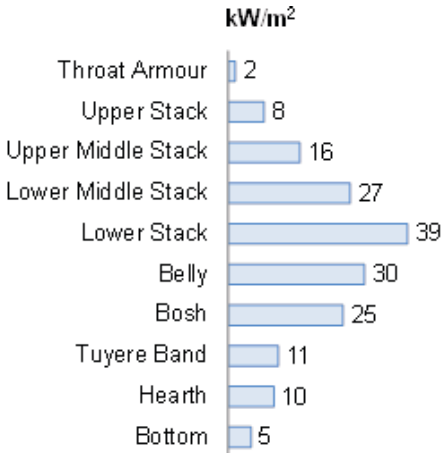


Рис. 4. Диаграмма тепловой нагрузки

Технические параметры систем охлаждения для данных двух конструкций приведены в таблице 1. Более высокий расход воды у первой конструкции является результатом особой трассировки, которая была оптимизирована для процедур по поиску утечек и компенсируется более низкой разницей температуры и давления. Мощность теплообменников сопоставима и не зависит от проекта футеровки.

Таблица 1. Системы обвязки и охлаждения.

	①	②
Расход [м³/ч]	4491	3703
ΔP [кПа]	585	780
ΔT [°C]	6.2	7.4
Расход энергии на насосах [кВт]	886	974
Теплообменник [МВт]	63.5	63.5

Вес конструкций для шахты доменной печи приведен на рис. 5 и является сопоставимым. Основная разница заключается в соотношении между огнеупорами и элементами охлаждения.

Анализ показывает, что инвестиционные затраты двух современных конструкций являются сопоставимыми. Операционные затраты могут значительно отличаться и зависят от эффективности конструкций. Эффективность технологии Hoogovens не вызывает вопросов. Типичный пример приведен на рис. 6 для доменной печи, работающей с высоким расходом пылеугольного топлива. Сейчас кампания длится уже 25-й год и схожие картины наблюдаются и на других заводах.

Несмотря на тот факт, что многие заводы с медными вертикальными холодильными плитами работают в соответствии с ожиданиями, также стало очевидно, что может возникнуть сильнейший износ,

что потребует частых остановок на техобслуживание, ремонт и преждевременный капремонт, что негативно влияет на производительность и расход кокса при эксплуатации. На рис. 7 показан износ медной вертикальной холодильной плиты.

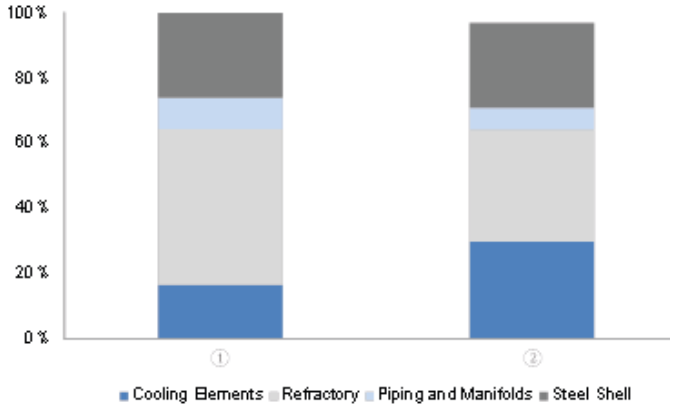


Рис. 5. Относительный вес

Рис. 6. Эффективность конструкции ①

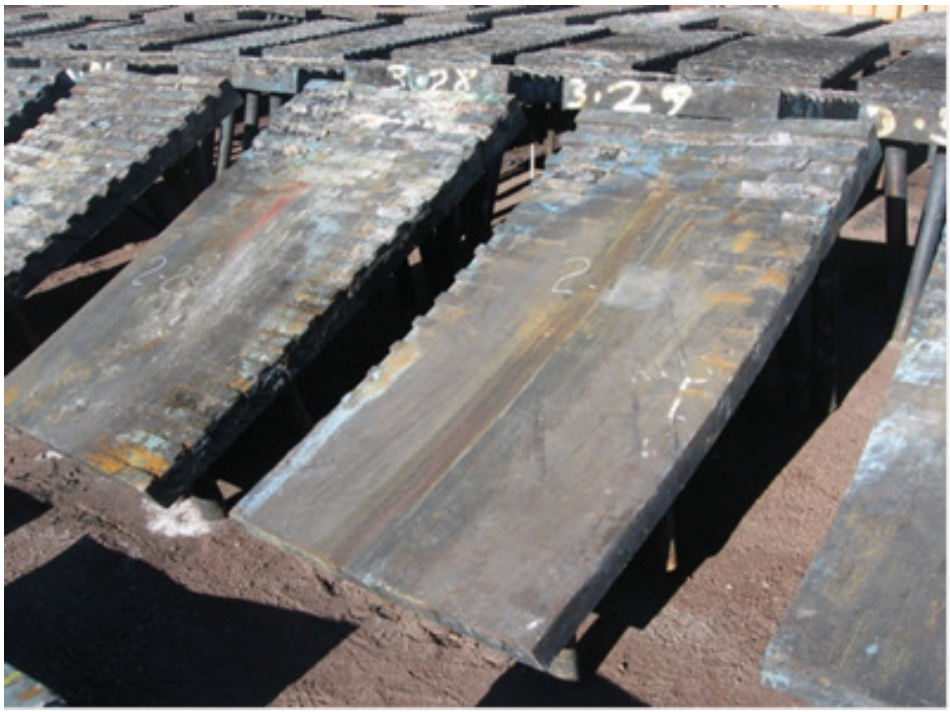


Рис. 7. Вариант ②

За последние десять лет были проведены многочисленные исследования с целью понять причины неполадок, связанных с износом. Разработчики заявляют, различные улучшения конструкции медных вертикальных холодильников снижают риски, но на практике это не было продемонстрировано. Многочисленные предлагаемые решения основаны на том, чтобы изменить параметры работы доменной печи, чтобы защитить футеровку вертикальных холодильников. Это вызывает дискуссии о взаимной зависимости между процессом и футеровкой печи для обеих конструкций доменной печи. Хотя эти споры не являются предметом данной статьи, авторы пока не сталкивались со случаями, когда операторы сталкивались с ограничениями, связанными с конструкцией футеровки на основе медных горизонтальных холодильников и огнеупоров с высокой теплопроводностью.

3. МОДУЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Преимущество медных и чугунных вертикальных холодильников заключается в возможности их предварительного монтажа на кожухе, что сокращает сроки перефутеровки при использовании технологии модульного строительства. Технология модульного строительства доменных печей применяется с 1990-х после того как в 1970-е в других отраслях промышленности появились продвинутые технологии транспортировки и подъема больших грузов. Данные технологии включают в себя самоходный модульный транспорт, системы домкратов и канатных домкратов, как показано на рис. 8 на следующей странице. Системы транспортировки и подъема являются компактными и обеспечивают значительное сокращение срока остановки для перефутеровки. Полная замена корпуса доменной печи усовершенствуется.

Рис. 8. Системы подъема и транспортировки

Длительность работ при обычном капремонте обычно составляет более 120 дней, но она может быть уменьшена до менее 70 дней при применении технологии модульного строительства. Предварительным требованием для модульного строительства является наличие пространства рядом и вокруг доменной печи и достаточная прочность конструкции башни опорной системы и/или конструкций литейного двора для их использования в качестве временной опоры для модулей доменной печи.

Для свободного проведения работ внутри печи необходимы вспомогательные складные и передвижные площадки. Складная конструкция показана на рис. 9: диаметр площадки может регулироваться для работы с различными диаметрами заплечиков, распара и шахты доменной печи.

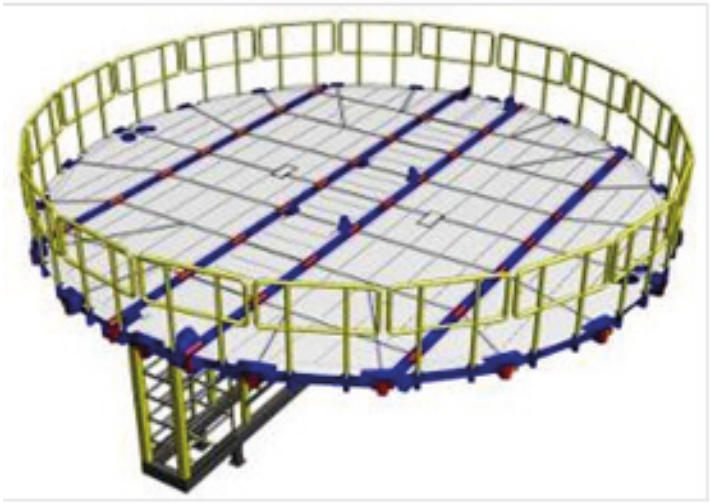


Рис. 9. Складная и передвижная площадка

Технология модульного строительства часто использовалась в нашей промышленности для капремонта с использованием медных и чугунных вертикальных холодильников, так как они могут быть предварительно смонтированы на кожухе без риска повреждения, например футеровки огнеупорами. При этом огнеупоры не устанавливаются, либо они являются составной частью вертикального холодильника. Сходная технология была разработана для капремонта по технологии Hoogovens в рамках проекта по оказанию консультационных инженерных услуг.

Объем работ по проекту частичному капремонту показан на рисунке 10 и включает в себя замену вертикальных холодильников заплечиков, пояса и шахты, а так же кожуха (показано красным слева) на новый кожух, медные горизонтальные холодильники, графит и карбид кремния (справа зеленым). Медные вертикальные холодильники выходили из строя в связи с деформацией кожуха и появлением трещин менее чем через 5 лет после запуска. Горн и верхняя шахта не требуют перефутеровки и, таким образом, была рассмотрена возможность проведения частичной перефутеровки с заменой медных вертикальных холодильников на медные горизонтальные холодильники, графит и карбид кремния с минимальным сроком остановки.

Типичная модульная конструкция нижней шахты показана на рисунке 11 и включает в себя предварительно смонтированный медный горизонтальный холодильник, огнеупоры из графита и карбида кремния, внешнюю обвязку и временные усиливающие конструкции.

Деформация модуля при транспортировке, подъеме и монтаже составляет менее 2,5 мм, как это показано на деформационных моделях (рисунок 12). Это может быть осуществлено при помощи современных тяжелых строительных систем с цифровым контролем цилиндров для обеспечения равномерного распределения сил, создаваемых транспортным оборудованием.

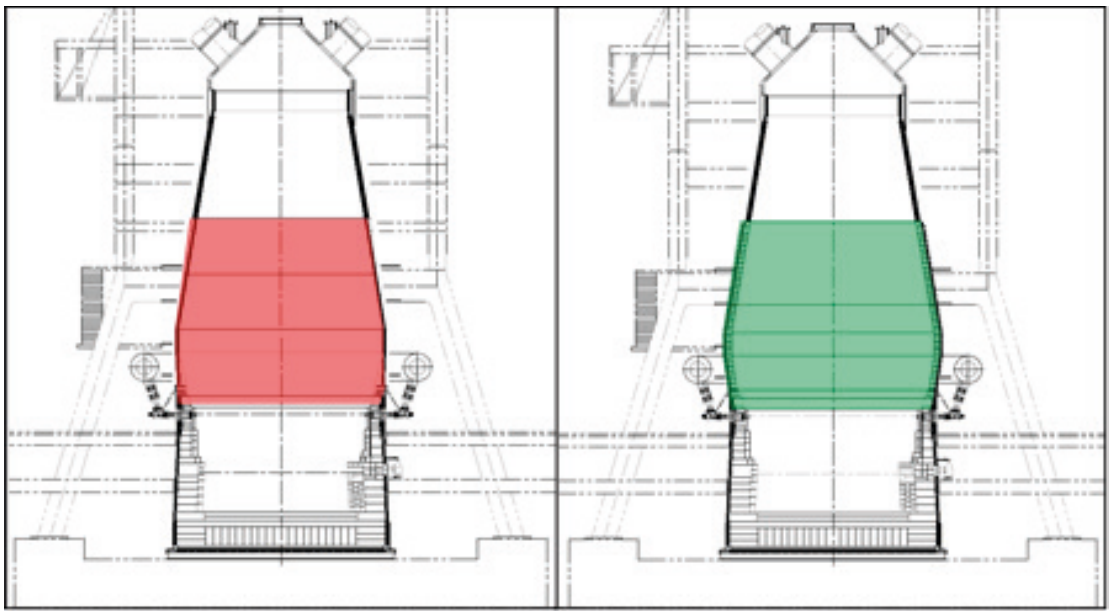


Рис. 10. Границы проекта частичной перефутеровки

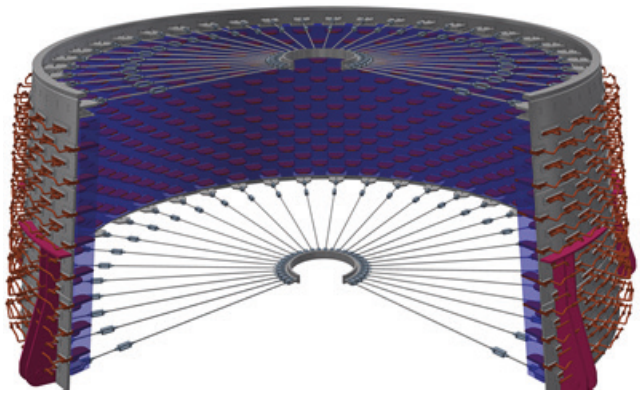


Рис. 11. Модульная конструкция

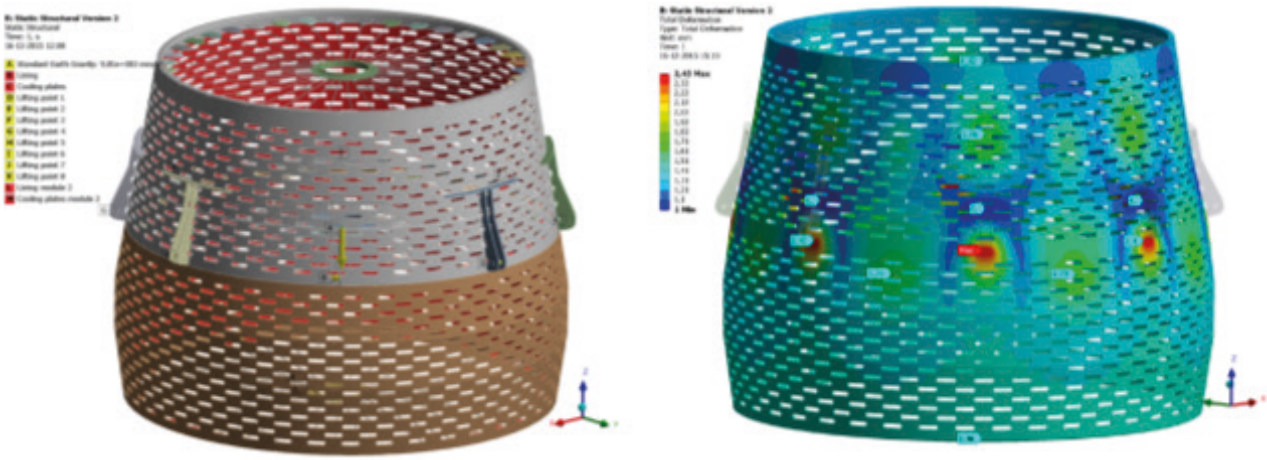


Рис. 12. Деформационная модель кожуха

Данные модули с предварительно смонтированной футеровкой сопоставимы с «обычными» модулями с медными или чугунными вертикальными холодильниками. Сопряжение двух модулей, использующих предварительно смонтированную футеровку, является очень важным вопросам, но и при обычной смене футеровки такой способ использовался при одновременной работе на нескольких уровнях. Типичные пример сопряжения футеровки модулей показаны на рисунке 13.

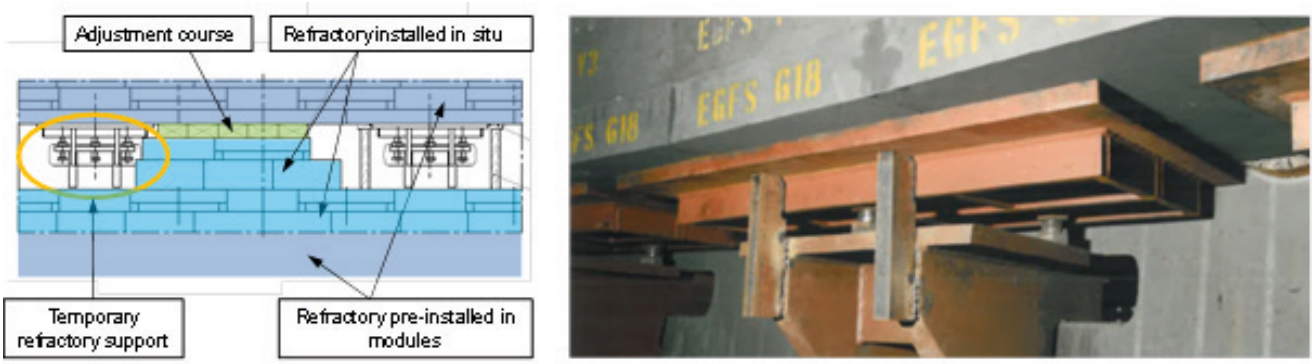


Рис. 13. Сопряжение огнеупоров

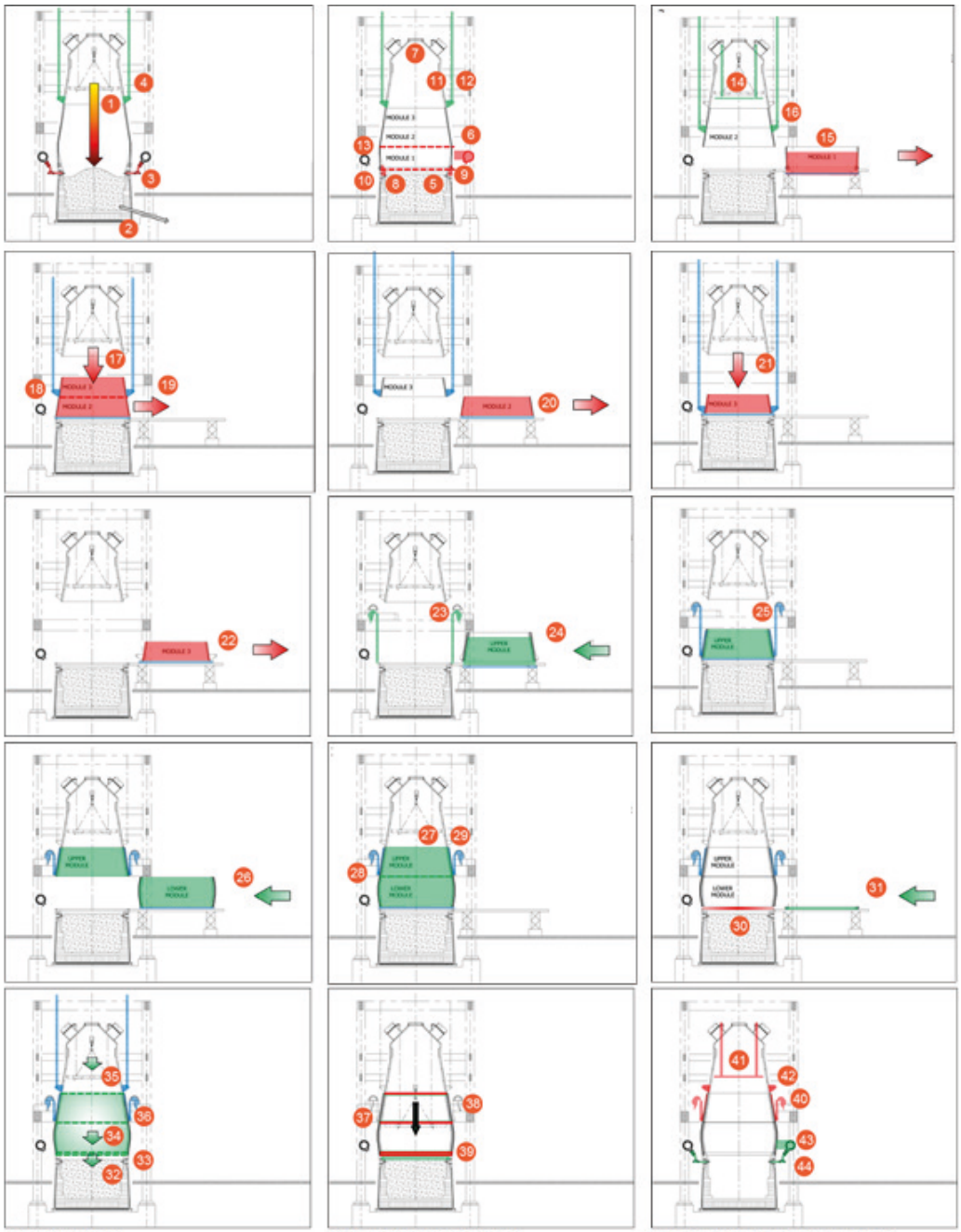
Подробная процедура демонтажа и монтажа показана на рисунке 14. Работы до остановки на капремонт включают в себя работы на литейном дворе и направлены на то, чтобы обеспечение достаточного пространства для транспортировки модулей и установки настила, систем домкратов и канатных домкратов. Предварительная сборка модулей должна быть выполнена рядом с печью, чтобы сократить расстояние передвижения транспорта. Могут понадобиться временные и локальные усиления конструкций башни четерехколонника. Кроме того, могут быть смонтированы элементы системы охлаждения.

Выпуск козла необходим при остановке для обеспечения рабочих условий во время (частичной) смены футеровки. Кроме того, выпуск козла способствует охлаждению и задувке доменной печи. Удаленное бурение (рисунок 15) обеспечивает безопасные условия работы. Верхний слой из шлакового песка обустраивается на верху остающейся шихты после этого можно демонтировать фурмы или производить ремонт торкретированием. Такой верхний слой эффективно изолирует горн, предотвращая попадание кислорода и предотвращает окисление углерода. Кроме того, это предотвращает риск наличия угарного газа в домне, но при этом всегда необходима дополнительная система вентиляции.

Сам демонтаж может быть выполнен после установки передвижной площадки и установки системы подвески колошника. В связи с пространственными ограничениями на данном конкретном заводе, необходимы три модуля для демонтажа. Два больших новых модуля и одно маленькое переходное кольцо устанавливаются после того, как был произведен демонтаж. Максимальный вес каждого из крупных модулей составляет ~ 600 тонн. Перед подъемом на окончательное положение, первый и второй крупные модули частично свариваются для ускорения монтажа третьего модуля. Подгонка поверхностей огнеупоров производится после выполнения сварки.

Внешняя система трубопроводов обвязки системы охлаждения может быть изменена одновременно с модульным строительством. Может быть установлена независимая система охлаждения, но обычно более экономичным вариантом является привязка новой системы охлаждения к существующей (рисунок 16 выше).

Общий период остановки для такого частичного капремонта большой доменной печи может составлять до сорока дней. Основные виды работ во время такой остановки приведены на графике, на рисунке 17. Согласно такому графику также возможна замена леток в рамках обычных внешних ремонтных работ на летках. Задувка печи осуществляется с использованием газокислородных горелок, которые наиболее эффективны, если была произведена контролируемая выдувка печи. Сравнительный график полной смены футеровки, включая замену всей печи, составляет менее 70 дней.



1. BLOW DOWN FURNACE
2. SALAMANDER TAP
3. REMOVE PENSTOCKS & TUYERE ASSEMBLIES
4. INSTALL BF TOP SUSPENSION
5. REMOVE BURDEN, RAKE FLAT, CAPPING WITH SLAG SAND THROUGH TUYERES
6. REMOVE BUSLE MAIN SEGEMENT (90°)
7. INTRODUCE MOVEABLE PLATFORM. MAKE SAFE
8. DEMOLITION REFRACTORY ABOVE TUYERE BELT
9. CUT PENETRATION HOLES FOR SKID BEAMS (4 OFF)
10. CUT SHELL (MODULE 1, LOWER)
11. TENSION STRAND JACKS
12. LIFT SHELL 50-100 MM
13. CUT SHELL (BETWEEN MODULE 1 AND 2)
14. INSTALL MOVEABLE PLATFORM THROUGH BF TOP MAINTENANCE DOOR
15. SKID OUT MODULE 1
16. INSTALL SECOND SET OF STRAND JACKS
17. LOWER MODULE 2 AND 3 TO SKID BEAM
18. CUT SHELL BETWEEN MODULE 2 AND 3
19. SKID OUT MODULE 2
20. SKID OUT MODULE 2
21. LOWER MODULE 3 TO SKID BEAMS
22. SKID OUT MODULE 3
23. INSTALL STRAND JACKS AT LOWER ELEVATION
24. SKID IN UPPER MODULE
25. CONNECT STRAND JACKS, LIFT UPPER MODULE AND HOLD IN POSITION
26. SKID LOWER MODULE INTO POSITION AND LIFT
27. RELEASE UPPER MODULE TO TOUCH LOWER MODULE
28. WELD HORIZONTAL JOINT 25% BETWEEN UPPER AND LOWER MODULE
29. LIFT LOWER + UPPER MODULE TO TOUCH REMAINING TOP PART AND HOLD IN POSITION
30. REMOVE UPPER PART OF SKID BEAMS (LEAVE IN BF)
31. INSERT ADAPTER RING INTO POSITION (WITHOUT REFRACTORY)
32. LOWER THE BF SHELL TO ADAPTOR RING
33. WELD ADAPTOR RING TO TUYERE BELT & BF SHELL
34. LOWER THE UPPER + LOWER MODULE TO ADAPTOR RING
35. LOWER EXISTING BF TOP PART IN ORIGINAL POSITION
36. WELD ALL HORIZONTAL WELDS OF BF SHELL 100%
37. REMOVE STIFFENING CONSTRUCTIONS INSIDE BF MODULES
38. INSTALL REFRACTORY MARRY-UPS BETWEEN MODULES USING THE MOVEABLE PLATFORM
39. INSTALL REFRACTORY AT TUYERE AREA / ADAPTOR RING
40. REMOVE STRAND JACKS
41. REMOVE MOVEABLE PLATFORM
42. REMOVE LIFTING POINTS, ETC
43. RE-INSTALL BUSTLE MAIN SECTION
44. INSTALL TUYERE STOCKS

Рис. 14. Модульное строительство при смене футеровки

Рис. 15. Дистанционный выпуск козла

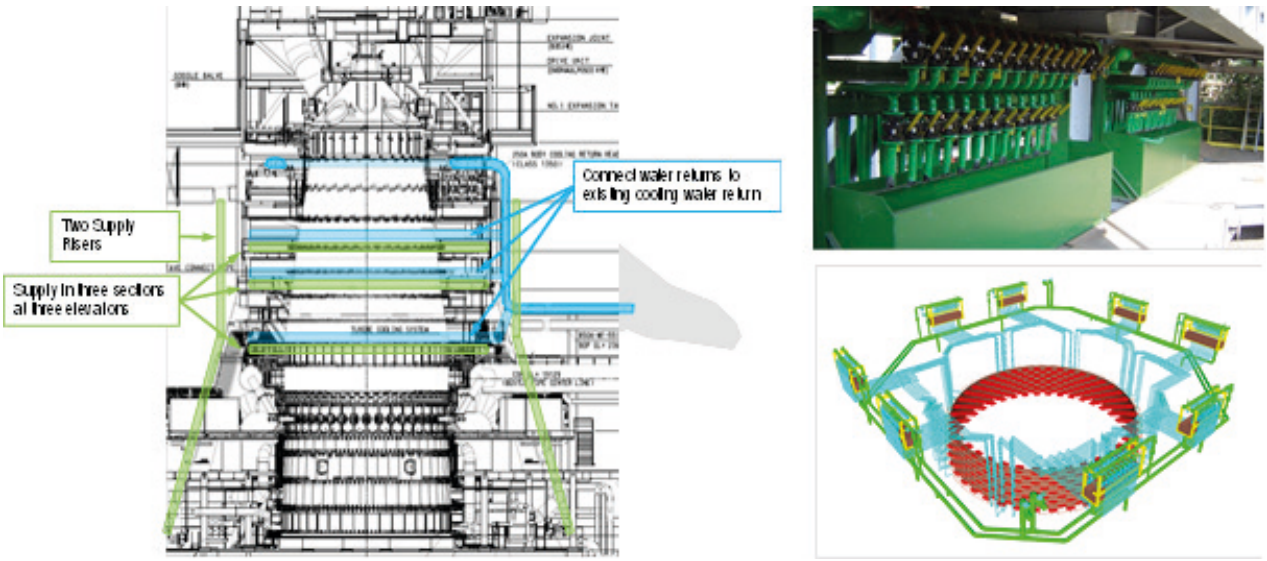


Рис. 16. Системы обвязки и охлаждения

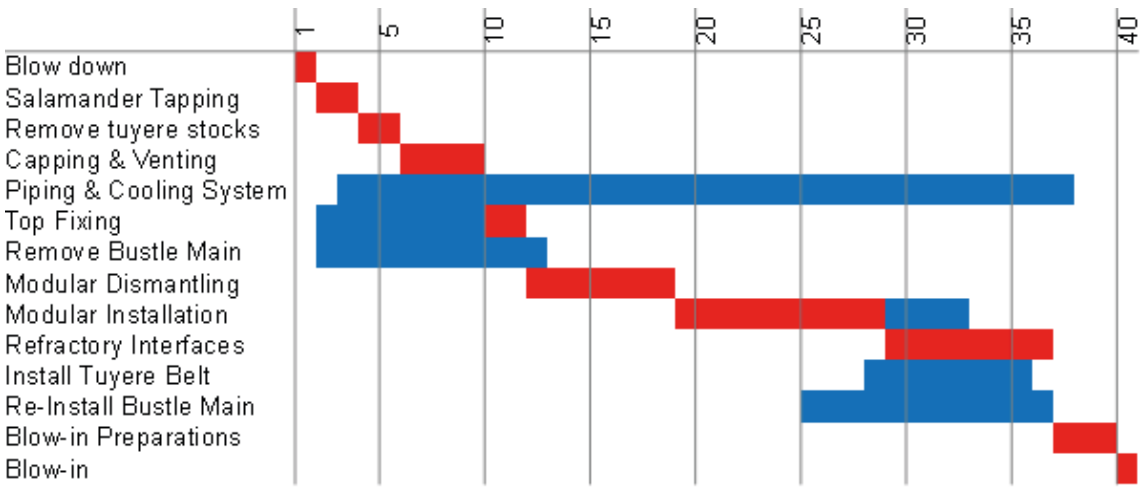


Рис. 17. График выдувки

4. ВЫВОДЫ

- В современных конструкциях доменных печей применяются современные конструкции горна и лещади с использованием полуграфитовых, микропористых с высокой проводимостью (ультра микропористый углерод), внешнюю водяную охладительную рубашку кожуха горна, водяное охлаждение лещади.
- В конструкции заплечиков, пояса и шахты применяются медные горизонтальные холодильники, огнеупоры из графита и карбида кремния, с помощью которых достигаются длительные сроки кампаний печи и повышенный годовой ресурс эксплуатации;
- Технология модульного строительства часто применялась при смене футеровки доменной печи с использованием медных и чугунных вертикальных холодильников.
- Технология модульного строительства была недавно разработана для технологии Hoogovens.
- Данная технология позволяет достичь продолжительности остановки при частичном капремонте сроком 40 дней, а при полном капремонте печи — 70 дней.

В.Н. Панин, ГП «Укргипромез»

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ДП № 4 МЕТКОМБИНАТА «ЗАПОРОЖСТАЛЬ»

Настоящим проектом предусматривалось выполнение реконструкции доменной печи в существующем объеме 1513 м^3, с оборудованием печи 20-ю фурменными приборами и 2-мя чугунными летками, расположенными под углом 38° относительно друг друга.

Заданием на проектирование предусматривается ремонт верхнего строения печи от уровня колошниковой площадки, включая ремонт трехконусного засыпного аппарата.

1. СОБСТВЕННО ДОМЕННАЯ ПЕЧЬ

1.1. Опорная система печи

Настоящим проектом предусматривается создание нового фундамента доменной печи с сооружением самонесущего кожуха.

Проектом предусматривается замена участков кожуха купола печи, а также кожуха низа печи до отм. +19,160 с увеличением его толщины до 40–60 мм.

Существующие колонны горна демонтируются, и сооружается новая четырехколонная опорная система, которая состоит из трех башен.

Нижняя башня состоит из четырех колонн, которые на уровне выше кольцевой трубы горячего дутья замыкаются кольцевой балкой.

Такая конструкция нижней башни обеспечивает свободные подходы к печи на уровне рабочей площадки поддоменника и площадки для обслуживания фурменных приборов.

Средняя башня состоит из шести существующих колонн, которые в плане приближены к печи на расстояние, достаточное для организа-

ции кольцевых площадок шахты печи со свободными проходами и хорошим доступом к кожуху и системе охлаждения печи.

На колонны средней башни опирается колошниковая площадка, и подвешиваются кольцевые площадки шахты печи.

Конструкцией нижней и верхней башни предусматривается во время ремонта печи возможность переопирания кожуха на четырехколонную систему.

На колошниковую площадку опирается существующая верхняя башня, на конструкциях которой размещаются площадки, оборудование загрузочного устройства и монтажная балка.

1.2. Система охлаждения печи

Доменная печь охлаждается плитовыми холодильниками.

Для охлаждения лещади и горна рассматривается установка четырех рядов плитовых холодильников с параллельными трубами взамен змеевиков, которые «повязаны» по вертикали.

Холодильники фурменной зоны и леток для чугуна традиционные плитовые.

Холодильники заплечиков, распара и нижней части шахты системы испарительного охлаждения, плитовые с ребрами.

Верх шахты охлаждается плитовыми холодильниками с ребрами и неохлаждаемыми выступами (зубьями).

Первый ряд холодильников верха шахты имеет выступ для опирания шамотной кладки.

Нижний ряд защитных плит колошника — водоохлаждаемый.

Под металлическим днищем печи размещаются трубы водяного охлаждения.

Водоснабжение ДП № 4 предусматривается комбинированным.

Охлаждение низа печи и верха печи, резервирование системы испарительного охлаждения (СИО) предусматривается технической водой в оборотном цикле от существующей системы.

Охлаждение заплечиков и низа шахты печи предусматривается системой испарительного охлаждения.

1.3. Футеровка печи

Профиль доменной печи выполнен с учетом использования в качестве дополнительного топлива угольной пыли.

При этом значительно увеличивается рудная нагрузка и как следствие увеличивается вес шихты в печи и снижается газопроницаемость.

Для противодействия этим отрицательным «факторам» в профиле печи увеличены расстояния между лещадью и чугунными летками, воздушными фурмами и чугунными летками, уменьшен угол наклона заплечиков, увеличено количество воздушных фурм.

Футеровка лещади по конструкции предусматривается цельноуглеродистая с верхними тремя рядами из муллитокорундового кирпича.

Для повышения эффективности работы первого ряда холодильников лещади первый ряд из графитизированных блоков и один ряд из углеродистых укладываются горизонтально (по условиям изготовления теплопроводность по длине блока на 20–30% выше, чем в поперечном направлении).

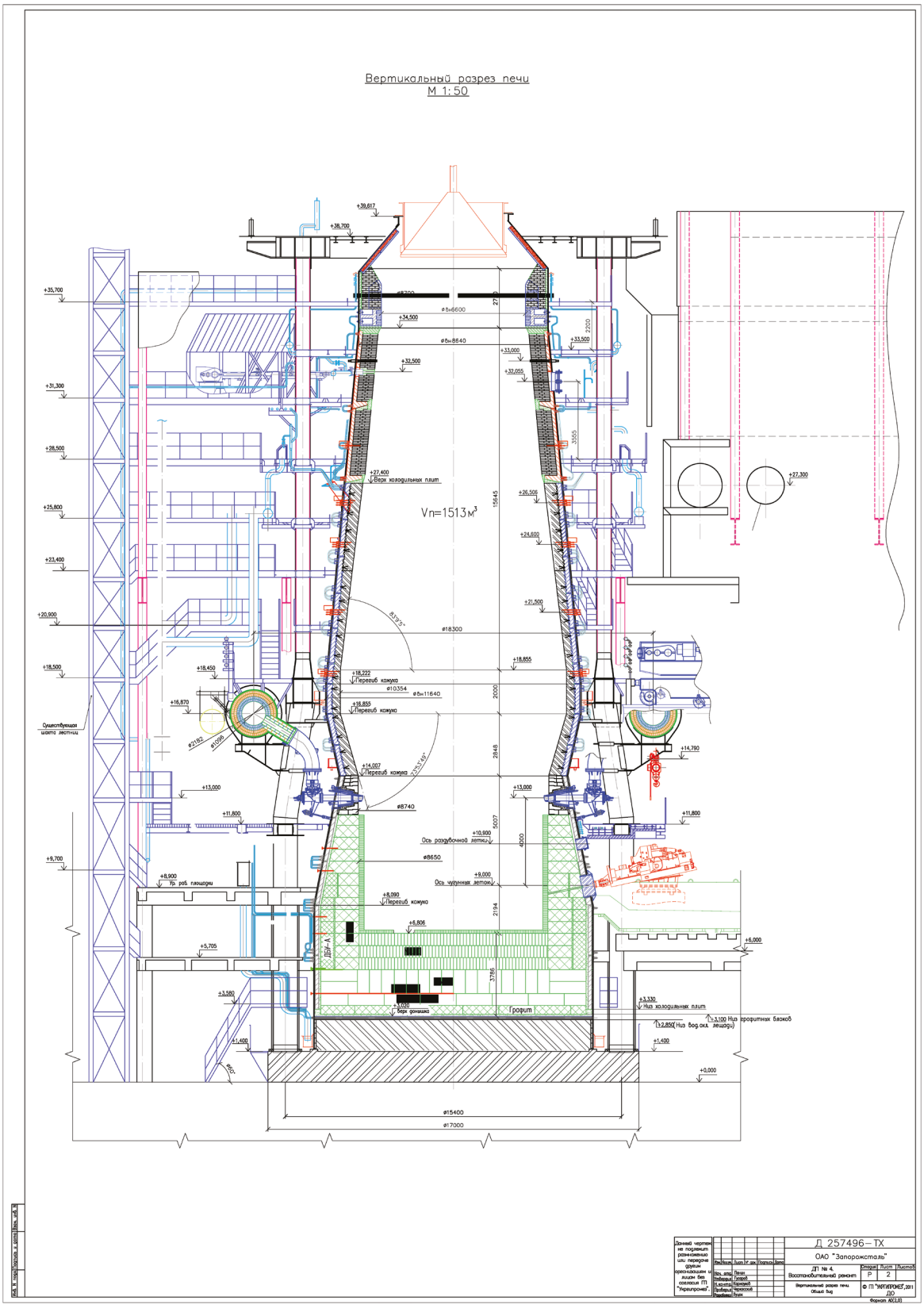
Для заполнения пространства между металлическим днищем печи и трубами системы водяного охлаждения предусматривается углеродистый бетон.

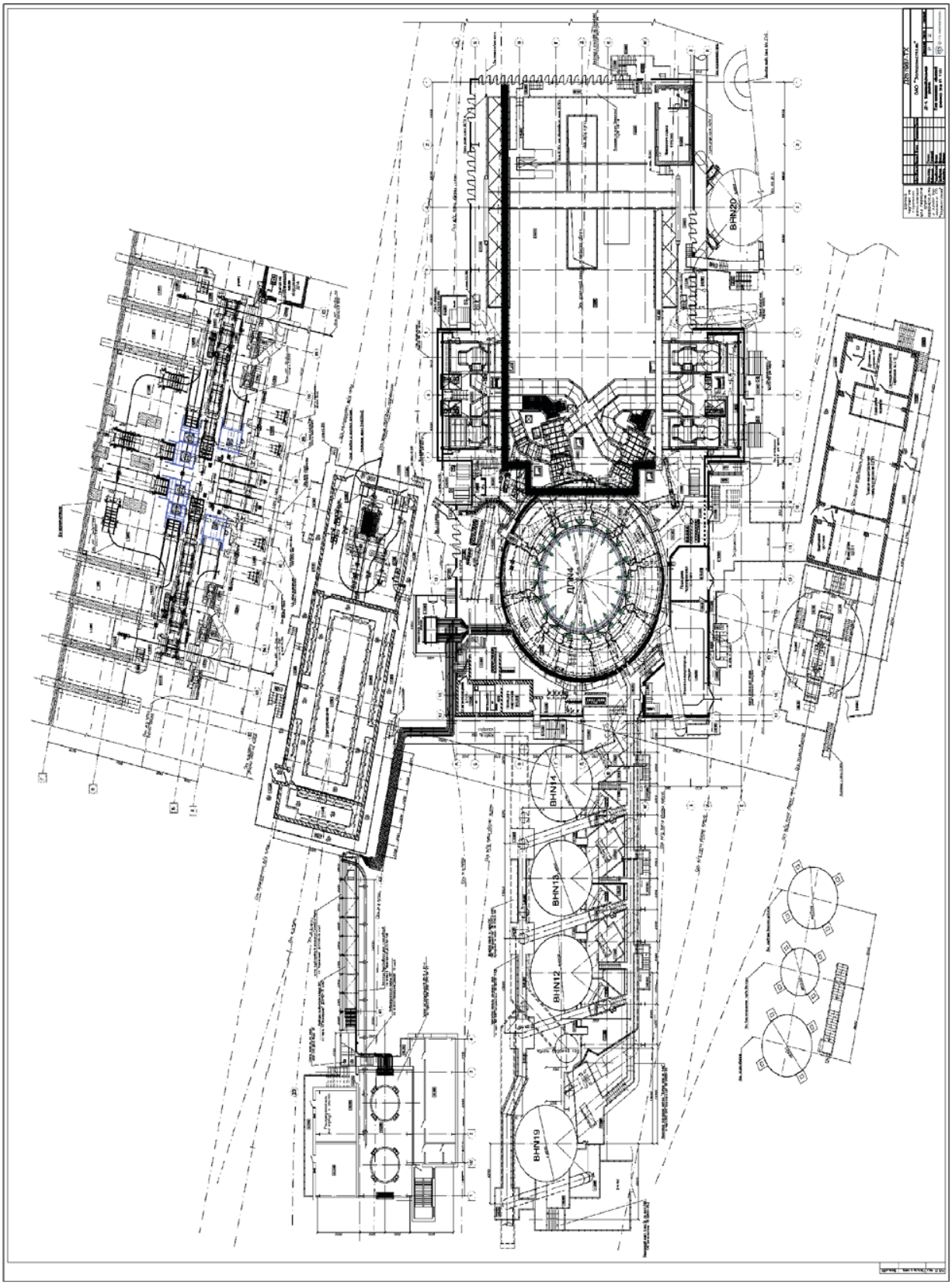
Заполнение зазоров между холодильниками и периферийными блоками предусматривается холоднонабивной массой повышенной теплопроводности.

Распределение шамотных огнеупоров по высоте футеровки фурменной зоны, верха шахты выполняется в соответствии с инструкцией по футеровке доменных печей. Конструкция футеровки шахты тонкостенная.

Футеровка заплечиков, распара и зона шахты, охлаждаемая системой испарительного охлаждения, предусматривается из специальных высокостойких бетонов.

Зазор между холодильниками и кожухом по высоте заполняется безусадочным бетоном.


Вертикальный разрез печи
М 1:50
Vп=1513м³
Верх холодильных плит
Перегиб кожуха
Ось раздувочной летки
Ось чугунных леток
Ур. роб. площадки
Верх фонтана
Графит
Низ холодильных плит
Низ вод.окл. лещади
Низ графитных блоков
Существующая шахта лестниц
ДБУ-А
Д 257496-ТХ
ОАО "Запорожсталь"
ДП № 4.
Восстановительный ремонт
Вертикальный разрез печи
Общий вид
Р
2
ДО
Формат А0(2,0)


ВНН20
ВНН14
ВНН13
ВНН12
ВНН19

1.4. Прочие мероприятия

Предусматриваются защитные плиты купола печи.

Для обслуживания загрузочного устройства предусматривается ремонт металлоконструкций монтажной балки.

Предусматривается установка укрытия приемной воронки с подключением к аспирационной системе бункерной эстакады.

Для подавления выбросов из межконусного пространства загрузочного устройства печи используется существующая система азотоподавления.

Доменная печь оборудуется системами контроля разгара футеровки металлоприемника, контроля температур футеровки и кожуха, контроля расхода воды и перепада температур на холодильниках и фурмах.

Над уровнем засыпи устанавливаются четыре термозонда для замера температуры по радиусу печи.

Ниже защитных плит колошника под уровнем засыпи шихты устанавливаются две машины для отбора проб газа по радиусу печи. Управление машинами местное. На печи также предусматриваются фурмы для отбора статического давления, штуцера для заливки раствора в печь, лазы.

Таблица 1.1. Технологические показатели работы ДП № 4 после реконструкции

	Наименование показателей	Количество
1	Производительность, тыс. т/год т/сут	1112 3115
2	КИПО, м^3 сут/т	0,5
3	Годовой фонд рабочего времени, сут	357
4	Доля в железорудной части шихты, %: — агломерат — окатыши	 73 27
5	Температура дутья, ^{0}C	1170
6	Давление газа под колошником, МПа	до 1,5
7	Расход шихтовых материалов, кг/т чугуна: — агломерат скиповый — окатыши скиповые — известняк обычный — кокс скиповый сухой (без мелочи)	 1265 456 83 388
8	Расход технологических энергоресурсов: — дутье (без учета потерь), м^3/т чугуна — кислород технологический, м^3/т чугуна — газ природный технологический — угольная пыль, кг/т чугуна	 1280 37,5 – 150
9	Выход доменного газа, м^3/т чугуна	1660
10	Выход шлака, кг/т чугуна	440
11	Вынос пыли колошниковой (уловленной), кг/т чугуна	19

Доменная печь оборудуется фурменными приборами обычной конструкции с учетом устройства для вдувания ПУТ. Фланцы фурменных приборов неохлаждаемые вварные.

Количество воздушных фурм — 20.

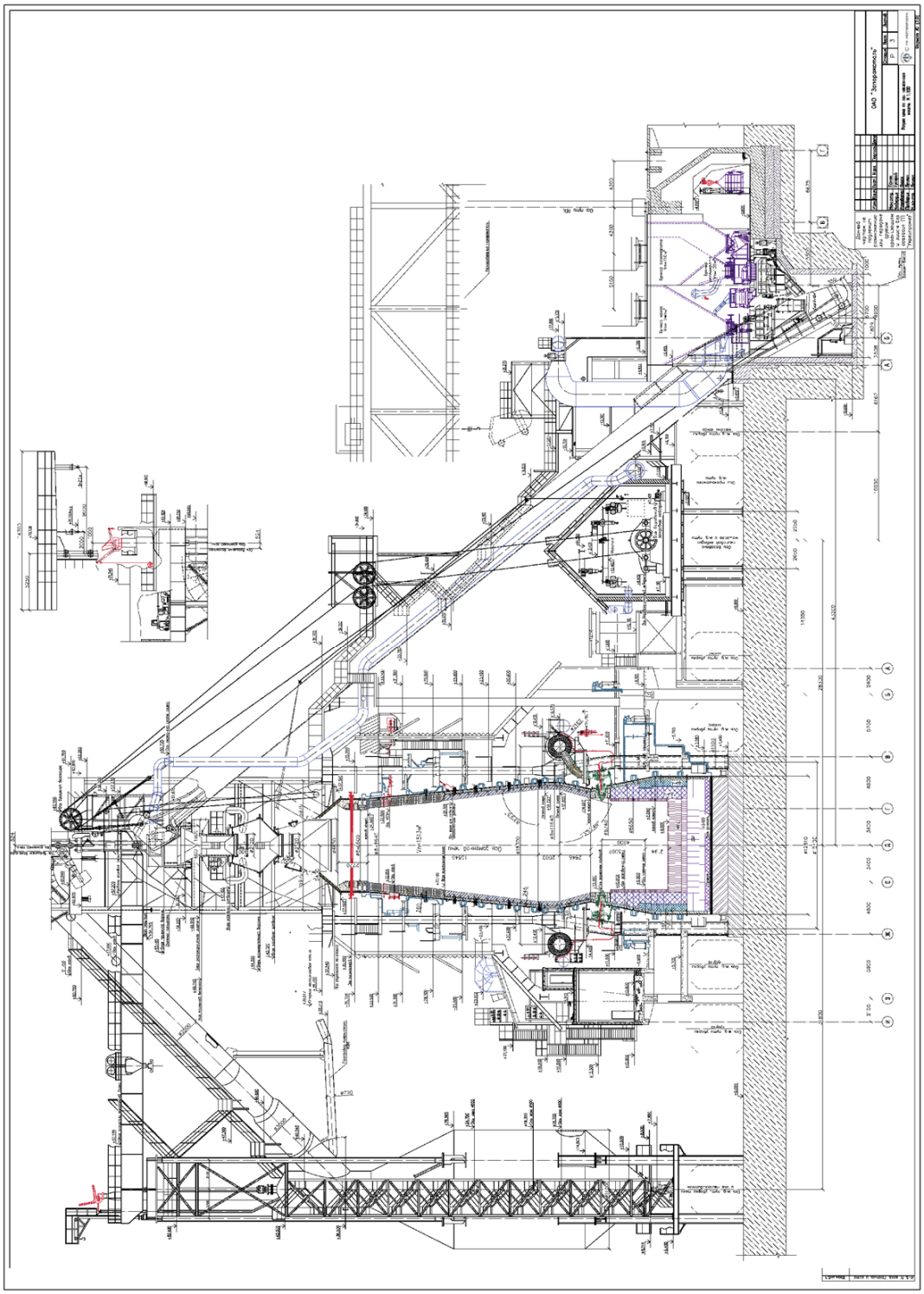
Шлаковая летка не предусматривается.

Для выпуска чугуна и шлака предусматриваются две чугунные летки, расположенные под углом 380.

Предусмотрена раздувочная (аварийная) летка.

2. ПОДДОМЕННИК И ЛИТЕЙНЫЙ ДВОР

На доменной печи реконструируется литейный двор с созданием ровной рабочей площадки без перепадов и уклонов, приспособленный для работы напольных механизмов.



На бетонные фундаменты устанавливаются естественно охлаждаемые главные желоба, транспортные желоба опираются на металлические опоры.

Главные и транспортные желоба сварной конструкции, приспособлены для футеровки высокостойкими огнеупорными массами и бетоном.

Главные желоба укрываются съемными объемными крышками, футерованными огнеупорным бетоном.

Крышки приспособлены к подключению воздуховодов системы аспирации.

Все транспортные желоба укрываются плоскими крышками в уровне с рабочей площадкой и футеруются огнеупорным бетоном.

Качающиеся желоба для чугуна и шлака оборудованы аспирационными укрытиями с отсосами.

На литейном дворе устанавливается однобалочный электромостовой кран грузоподъемностью 20/10 т.

Для обслуживания качающихся желобов, съема крышек с аспирационных укрытий мест слива чугуна и шлака, чугунных и шлаковых носков желоба, плоских крышек транспортных желобов на чугунной и шлаковой стороне литейного двора устанавливаются краны однобалочные грузоподъемностью 16 т.

Для вскрытия и закрытия чугунных леток предусматривается установка бурмашин с гидравлическим перфоратором и гидравлических пушек.

На опоре четырехколонника устанавливается один гидроманипулятор для перемещения крышек главных желобов. Предусматривается радиоуправление гидромеханизмами литейного двора.

Для разливки чугуна и шлака в ковши предусмотрена установка четырех качающихся желобов, оборудованных гидроприводами.

В районе чугунных леток, скиммеров и укрытий качающихся желобов предусматриваются аспирационные отсосы.

Площадки поддоменника печи решаются в двух уровнях.

Нижняя площадка является продолжением рабочей площадки литейного двора и имеет с ней одинаковую отметку. На этой площадке размещается оборудование системы охлаждения печи.

Площадка второго уровня предназначена для обслуживания фурменных приборов.

При проведении ремонтных работ в районе чугунных леток предусматривается съемная часть фурменной площадки с использованием электромостового крана литейного двора.

На рабочей площадке литейного двора и поддоменника размещаются встроенные помещения пультов управления гидромеханизмами для обслуживания чугунных леток, датчиков КИПиА, энергетика печи, комната отдыха горновых и хозяйственные помещения.

На рабочей и фурменной площадках поддоменника устанавливаются выносные пульты управления водяным охлаждением печи.

Вокруг печи предусматривается воздушное душирование от существующей централизованной вентстанции.

Между поддоменником и блоком воздухонагревателей устанавливается новая шахта лестниц с выходами на площадки доменной печи и воздухонагревателей.

3. ЗДАНИЕ СКИПОВОГО ПОДЪЕМНИКА С ЭЛЕКТРОПОМЕЩЕНИЯМИ И НАКЛОННЫЙ МОСТ

Из-за износившихся металлоконструкций наклонного моста и площадок обслуживания оборудования данным проектом предусматривается сооружение нового балочного наклонного моста. Предусматривается установка нового оборудования наклонного моста, применения скипов большего объема — 10 м^3.

Для размещения электрооборудования системы нижней и верхней загрузки и машзала сооружается новое здание взамен существующего.

В машзале скипового подъемника предусматривается установка скиповой лебедки ЛС-22,5.
Замена скипов осуществляется при помощи консольной части рудно-грейферного перегружателя.

4. ЗДАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧЬЮ, БЛОК ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ, ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЬ

Указанные объекты центрального узла печи подвергаются ремонту.

В существующем здании управления печью взамен парка приборов КИП устанавливается программно технический комплекс с установкой современного пульта управления печью и необходимого оборудования системы автоматического управления технологическим процессом на базе микропроцессорной техники.

На блоке воздухонагревателей предусматриваются работы по восстановлению футеровки кауперов, воздухопровода горячего дутья, дымовой трубы и борова, меняется участок смесителя с клапаном.

В проекте заложен частичный ремонт кожуха пылеуловителя, производится замена футеровки, замена лебедок управления атмосферными клапанами и отсечным клапаном пылеуловителя.

5. БУНКЕРНАЯ ЭСТАКАДА

Совершенствование доменного производства потребовало оптимальной схемы бункерной эстакады: с центральным расположением бункеров агломерата (температура агломерата собственной аглофабрики — 600°С) и заменой вагон-весов на автоматическую конвейерную систему шихтоподачи к скипам доменной печи.

Автоматическая система загрузки доменной печи № 4 шихтовыми материалами производится при помощи двух связанных между собой автоматизированных подсистем, условно называемых верхней системой загрузки и нижней системой шихтоподачи.

Нижняя система состоит из комплекса механизмов, осуществляющих набор, дозирование по весу и загрузку в скипы доменной печи кокса, всех видов железорудных материалов и добавок, а также уборку и отгрузку мелочи кокса и агломерата в железнодорожные вагоны, а верхняя — загрузку материалов из скипов в рабочее пространство доменной печи.

Бункерная эстакада условно разбита на три части:

- правую сторону, подающую шихтовые материалы в правый весовой бункер агломерата и далее в правый скип;
- левую сторону, подающую материалы в левый весовой бункер агломерата и далее в левый скип;
- центральную часть, обеспечивающую загрузку агломерата и кокса в весовые бункера.

С правой стороны бункерной эстакады расположены по четыре бункера окатышей с обеих сторон (8 шт.) и добавок V = 40 м^3 (футерованных марганцовистыми плитами) с вибропитателями, подающими материалы в бункерные весы добавок и окатышей V = 2 м^3.

Под весами добавок и окатышей установлен ленточный конвейер В=1000 мм для транспортировки материалов в бункерные весы агломерата V = 9 м^3.

В правой стороне бункерной эстакады в скиповой яме расположены: весы мелочи агломерата V=2 м^3 и мелочи кокса V = 2 м^3 (нижние весовые бункера), подъемник мелочи агломерата (скип V = 1,25 м^3), который транспортирует ее в верхние бункера мелочи агломерата V = 60 м^3 и далее через телескопическое загрузочное устройство в железнодорожный вагон; подъемник мелочи кокса (скип V = 1,25 м^3), транспортирующий ее из скиповой ямы в верхние накопительные бункера кокса V = 40 м^3 и далее в железнодорожные вагоны. Бункера мелочи кокса футеруются каменно-литыми плитами толщиной 80 мм с заполнением швов диабазовой замазкой.

Для крепления каменно-литых плит к стенкам бункеров привариваются стальные полосы толщиной 10 мм из стали марки 14Г2. В левой стороне бункерной эстакады в скиповой яме симметрично размещен тот же набор оборудования, что и в правой стороне.

В центральной части, в районе скиповой ямы, расположены: 2 бункера кокса V = 270 м^3 (футерованных кислотоупорным кирпичом) и 4 бункера агломерата. Два бункера агломерата футеруются каменно-литыми плитами толщиной 150 мм, а два бункера футеруют рельсовыми пакетами.

Кокс из расходных бункеров для рассева подается на 2 грохота кокса Q = 280 м^3 /час для разделения его на 2 фракции. Крупная фракция, 25…80 мм, поступает через течки в весы бункерные кокса (полезная вместимость V = 9 м^3), а затем в скипы. Мелкая фракция, 0…25 мм, течками подается в весы мелочи кокса (полезная вместимость V = 2 м^3), затем в скип мелочи кокса (вместимость V = 1,25 м^3), который выгружает мелочь в верхние бункера V = 40 м^3 и далее в железнодорожные вагоны.

Агломерат из расходных бункеров подается на 4 грохота агломерата. Крупная фракция, 5…100 мм, поступает в бункерные весы агломерата и в скип, а мелкая, 0…5 мм, подается в нижний весовой бункер мелочи, из него подается в скип подъемника мелочи и далее в верхний бункер мелочи. Далее мелочь поступает в телескопическое устройство и через него в железнодорожные вагоны.

Места пылевыделений на бункерной эстакаде снабжены специальными укрытиями из которых запыленный воздух удаляется в систему аспирации, что позволяет улучшить санитарную обстановку в районе бункерной эстакады, а для полов предусмотрена влажная уборка.

5.1. Тракт определения количества мелочи в агломерате и окатышах

При реконструкции бункерной эстакады ДП-4 предусматривается сооружение тракта определения количества мелочи в агломерате и окатышах (ТОКМ) поставляемых в доменный цех на ПАО «Запорожсталь» железнодорожными вагонами.

Г.И. Алымов, ЧАО «Днепрогидромаш»

«КОМПАНИЯ «ДНЕПРОГИДРОМАШ» — 20 ЛЕТ РАБОТАЕТ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГОВ

Основным направлением деятельности компании «ДНЕПРОГИДРОМАШ» на протяжении более 20 лет является разработка и изготовление гидравлического оборудования для металлургических предприятий. Для доменных и ферросплавных печей, агломерационных фабрик, ремонтных машин и нестандартного оборудования различного назначения.

Сегодня компания является одним из ведущих машиностроительных предприятий Украины, специалистами которой создан целый парк машин вскрытия-закрытия леток с гидравлическими приводами. Машины разрабатываются с учетом реальной ситуации на конкретной рабочей площадке, что позволяет компании успешно внедрять свои разработки на литейных дворах ферросплавных и доменных печей различной производительности.

Впервые машина с гидравлическими приводами для закрытия летки ферросплавной печи была разработана и внедрена специалистами компании в 1994 г., а первая гидравлическая машина закрытия летки доменной печи — в период 1998–2000 годах. Надо отметить, что эти машины до настоящего времени успешно эксплуатируются на Никопольском заводе ферросплавов и на комбинате «Запорожсталь».

Гидравлическое оборудование для литейных дворов доменных печей рассчитано на эксплуатационный ресурс, равный не менее 20–25 лет, т.е. на всю кампанию печи.

География поставок. На сегодня гидравлические машины, созданные компанией, работают на 13 доменных печах в Украине, на 6 доменных печах в России. Завершаются поставки оборудования, изготовленного для литейных дворов ДП-3 комбината «Запорожсталь» (Украина) и ДП-10 Магнитогорского металлургического комбината. (РФ).

Идет монтаж комплекса гидравлического оборудования для обслуживания чугунных леток доменной печи, поставленного по заказу предприятия «Tata Steel». Произведена отгрузка оборудования для обслуживания чугунных леток доменной печи, разработанного и изготовленного для предприятия «TATA METALIKS» (Индия).

Технологические машины ферросплавных печей успешно работают в Украине, России, Македонии, Гватемале, Грузии.

Компания «ДНЕПРОГИДРОМАШ» индивидуально разрабатывает компоновку оборудования на литейном дворе в каждом конкретном случае с целью оптимального использования рабочего пространства и максимальной эффективности работы оборудования, а также безопасности обслуживающего персонала, что достигается за счет подбора конструкции и технических характеристик машин и механизмов.

Оборудование аглофабрик. Компания «Днепрогидромаш» имеет опыт разработки и изготовления агломашин (рис. 1) и другого оборудования для агломерационных фабрик. Наши агломашины работают в Запорожье, в Магнитогорске, в Мариуполе на ЧАО «Азовсталь».

Рис. 1. Агломерационная машина

Компания «Днепрогидромаш» разработала конструкцию спекательных тележек и изготавливает их комбинированным способом — литые боковины и сваренные с ними балки для набора колосниковой решетки, выполненные из специальных сталей, способных нести высокие механические нагрузки при любых температурах. Ходовые ролики выполнены с применением закрытых подшипников, которые смазываются специальными высокотемпературными смазками. Спекательные тележки выполнены с надежным уплотнением, увеличивая за счет этого разряжение в вакуум-камерах и соответственно производительность агломашин (рис. 2).

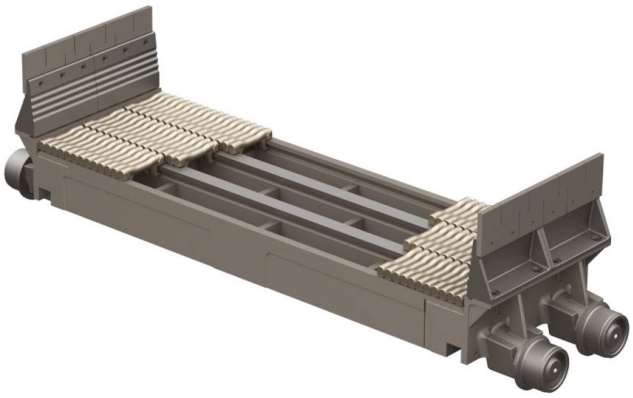


Рис. 2. Спекательная тележка

Конструкция и применяемые материалы исключают прогиб тележки, при этом отсутствует разуплотнение колосниковой решетки, уменьшаются просыпи материалов и потеря колосников: существенно уменьшается масса тележки, снижая нагрузки на привод и в целом на опорные конструкции спекательных пролетов. Снижается засорение батарейных циклонов и пылевых мешков, что уменьшает трудозатраты на их очистку.

Тележеки «Днепрогидромаш» прошли длительные испытания на аглофабрике «Тулачермет», где работает 15 тележек (5 штук — на протяжении 5,5 лет и 10 штук на протяжении 4,5 года). В процессе эксплуатации тележки показали высокую износостойкость, ремонтопригодность, а также практически полное отсутствие прогиба при длительной работе с циклическими термосменами. По износостойкости наши тележки превосходят или сравнимы с литыми из чугуна с шаровидным графитом..

Машины закрытия чугунной лётки разработанные и изготовленные компанией «ДНЕПРОГИДРОМАШ», отличаются высокой эксплуатационной надежностью и простотой в обслуживании. В конструкции машины сведено к минимуму количество шарнирных соединений. Это обеспечивает точность установки механизма прессования (пушки) на летку печи на протяжении длительного периода эксплуатации (рис. 3).

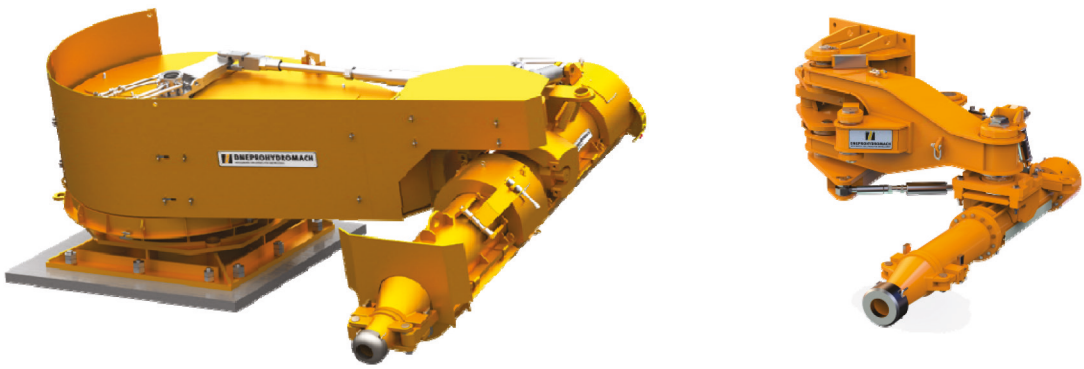


Рис. 3. Машина закрытия чугунной летки

Механизм прессования выполнен из материалов повышенной твердости, поршень снабжен специальными уплотнительными кольцами, исключающими попадание леточной массы за поршень. За счет регулируемого усилия прижима происходит надежное и качественное закрытие канала летки без разрушения футляра. Привод поворота по своей конструкции исключает необходимость в зацепе механизма прессования за кожух печи или водоохлаждаемую балку. Соответственно, улучшается доступ к летке для ее обслуживания, существенно снижаются нагрузки на кожух, тем самым уменьшается вероятность образования трещин в районе чугунной летки.

Усилие прижима пушки регулируемое и может достигать 40–60 тонн, однако по нашему мнению, усилие прижима должно настраиваться таким образом, чтобы используемая масса заполняла канал летки на всю длину, в тоже время, давление не должно быть чрезмерно высоким во избежание разрушения футляра чугунной летки.

К сведению, на печи объемом 5000 м^3 «Арселор Миттал Кривой Рог» работают электромеханические пушки с усилием прижима 15–20 тонн, которые обеспечивают нормальное и качественное закрытие летки на длину 3,0–3,5 м.

Машины вскрытия чугунной летки компании «ДНЕПРОГИДРОМАШ» по своим техническим характеристикам позволяют производить гарантированное вскрытие летки доменной печи при работе с любыми современными леточными массами (рис. 4).

Конструкция машин вскрытия чугунной летки имеет фиксированное положение штанги в передней части рамы, что обеспечивает точное расположение канала по оси летки. Канал летки при бурении с помощью штанги и коронки не разбивается, выпуск идет ровно без разбрызгивания продуктов плавки. Струя продуктов плавки идет строго по центру главного желоба, не разрушая стены и обеспечивая качественное разделение чугуна и шлака.

Рис. 4. Машины вскрытия чугунной летки

Специалистами компании «ДНЕПРОГИДРОМАШ» в 2006 году был разработан специально для вскрытия леток доменных печей перфоратор усиленной конструкции с гидравлическим вращением, пневматическим ударом и системой для подачи воздуха на продувку вскрываемого канала (рис. 5).

Рис. 5. Гидропневматический перфоратор

В конструкции перфоратора предусмотрено применение высоко-моментного, гидравлического мотора, позволяющего работать с любыми леточными массами, при этом, операция вскрытия летки выполняется без применения удара.

Вскрытие чугунной летки может осуществляться с продувкой канала азотом или воздухом (водо-воздушной смесью). Вскрытие летки без использования удара уменьшает вероятность повреждения футеровки района летки и футеровки печи. В случае необходимости, перфоратор обеспечивает независимый пневматический удар.

Преимущества гидропневматического перфоратора:

- компактность, простота в обслуживании и ремонте;
- надежность конструкции, проверенная многолетней эксплуатацией, изготавливается и поставляется с машинами вскрытия летки с 2006 года;
- возможность работы с любыми типами леточных масс;
- приспособлен для работы как со штангами и коронками, так и с обычным буром с пером.

Автоматика, которой снабжены машины вскрытия, позволяет определять длину чугунной летки, скорость бурения, усилие прижатия бурового инструмента, а также автоматическое включение удара.

Современные машины с гидравлическим приводом могут компактно располагаться как по обе стороны от главного желоба, так и с одной стороны, что позволяет выполнить укрытия главных желобов и устройства для аспирации.

Конструктивные изменения в кинематике движения МЗЧЛ и МВЧЛ обеспечили уменьшение их габаритных размеров по высоте. Это позволило монтировать кольцевые площадки на фурменной зоне, а крышка главного желоба уменьшилась в длине до 2.5–3,0 м.

Манипуляторы подъема крышек желобов предназначены для подъема и отвода съемных крышек главных желобов с целью обеспечения подхода к чугунной летке доменной печи машин вскрытия и закрытия чугунных леток (рис. 6).

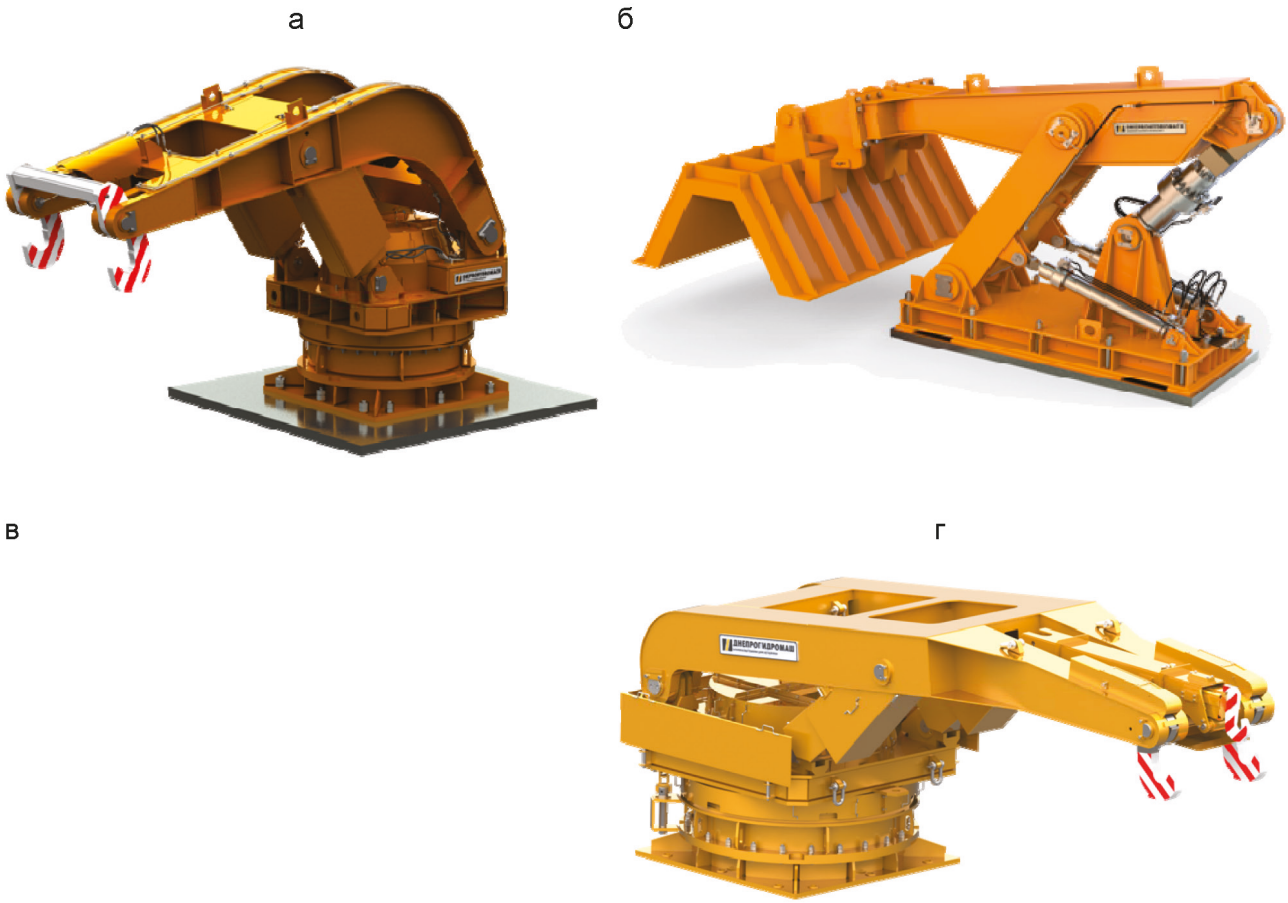


Рис. 6. Манипуляторы для съема крышек главных желобов

Разработаны конструкции манипуляторов поворотного типа, возвратно-поступательного движения, подвесного типа, с выдвигающейся стрелой. Выбор конструкции определяется реальной ситуацией на литейном дворе печи и требованиями Заказчика оборудования.

Скорости подъема и опускания съемных крышек главных желобов, а также скорость поворота (перемещения) стрелы манипулятора — регулируемые.

Манипулятор подвесной конструкции располагается между лётками и обеспечивает поочередное их обслуживание. Монтируется на специальных металлоконструкциях колонны печи и площадки фурменных приборов.

Техническая характеристика

Грузоподъемность, кН (тс)	100 (10)…200 (20)
Угол поворота стрелы, (регулируемый), град	Определяется планом литейного двора
Время подъема или опускания стрелы (регулируемое), с, не более	40
Время поворота стрелы на 360° (настраиваемое), мин, не менее	3

Конструкция манипулятора с выдвигающейся стрелой (рис. 6г) разработана с целью расширения технологических возможностей и позволяет использовать его не только для работы со съемной крышкой, а и для технического обслуживания и ремонта элементов главного жёлоба и лётки, а также подачи необходимого оборудования на фурменную площадку.

Техническая характеристика:

Грузоподъёмность манипулятора, кН (т):	
– для главной стрелы	150 (15) max
– для телескопической стрелы	20 (2) max
Угол поворота манипулятора из гаражного в рабочее положение / полный угол, град.	135° / ≈175°
Радиус поворота манипулятора, измеренный по крюку главной стрелы, мм	5600
Высота подъёма главной стрелы, мм	1540 max
Ход телескопической стрелы, мм	1400 max
Зев крюка у главной стрелы / у телескопической стрелы, мм	∅190 / 80
Время, с:	
– на полный поворот в одну сторону,	≈60…120
– на подъём (опускания) главной стрелы	≈15…25
– на зацеп (расцеп) крюка главной стрелы	≈ 3…5
– на полный ход телескопической стрелы в одну сторону	≈10…15
Частота вращения манипулятора (оптимальная), мин$^{-1}$	0,2...0,4

Манипуляторы позволяют производить захват и отвод крышки без непосредственного участия человека с помощью дистанционного управления.

Качающиеся желоба предназначены для одноносковой механизированной разливки чугуна в ковши чугуновозов и шлака в чаши шлаковозов.

Конструкция люльки и самого желоба позволяет производить его замену без демонтажа сливного носка, что очень удобно при проведении ремонта футеровки или металоконструкции.

Индивидуальный подход к установке оборудования на каждой отдельно взятой доменной печи позволяет произвести модернизацию литейных дворов без больших капиталовложений и с минимальным изменением планировки. Это обстоятельство является особенно важным для печей малого объема. К примеру ДП №3 и ДП №5 в г. Енакиево.

В настоящее время компания «Днепрогидромаш» тесно сотрудничает с проектными организациями, в части выполнения проектных работ по полному комплексу компоновки литейного двора. В частности, нами выполнены полные проекты, с разводкой аспирации, литейных дворов ДП №№ 9 и 10 ОАО «ММК» в г. Магнитогорске.

Машины для облуживания чугунных леток доменных печей, разработанные и изготовленные компанией «ДНЕПРОГИДРОМАШ», отличаются высоким качеством, надежностью в эксплуатации, ремонтопригодностью, широкими возможностями по рациональному размещению.

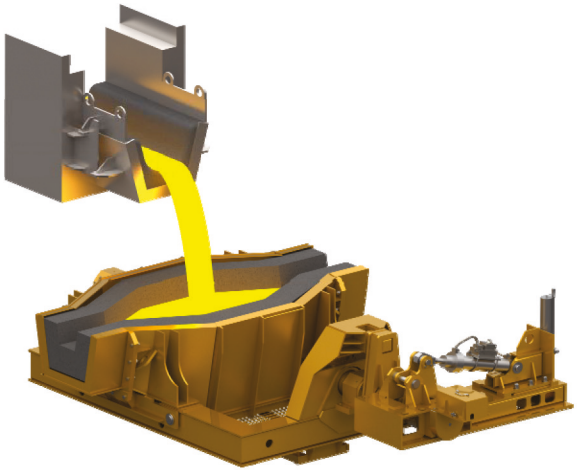


Рис. 7. Качающийся желоб

Конструкторским центром компании завершен проект создания бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) лоткового типа для доменных печей. Документация передана в производство, проводятся подготовительные работы по закупке необходимых материалов и комплектующих изделий.

В конструкции нового загрузочного устройства применены технические решения, учитывающие современные требования к процессу загрузки и распределения материалов по сечению колошника доменной печи, а также позволяющие выполнить размещение устройства в существующих габаритах копра.

Бесконусное загрузочное устройство «HydroMech Top» конструкции компании «ДНЕПРОГИДРОМАШ» является одной из важнейших разработок последних лет. Загрузочное устройство доменной печи разработано в двух вариантах — однотрактовое (рис. 7б) и двухтрактовое (рис. 7а) и содержит распределитель лотковый, устанавливаемый на фланец колошника доменной печи, шихтовый тракт, состоящий из одного или двух параллельных загрузочных трактов, приемной воронки с двумя шихтовыми затворами. Шихтовые тракты содержат технологическую задвижку, сильфонный узел, клапаны газо-уплотнительные, шихтовый затвор, бункер, Кроме того, БЗУ снабжено электрооборудованием, элементами системы взвешивания, системы управления, гидро-пневмооборудованием и телеметрией.

Установка БЗУ не требует изменения угла наклонного моста, что снижает затраты на реконструкцию тракта подачи шихты на колошник.

Система выравнивания давления в промежуточном бункере предусматривает работу как на инертном газе (азот), так и на очищенном доменном газе. Предусмотрено, как резерв, для нейтрализации взрывоопасной смеси, использование пара.

Система управления БЗУ позволяет производить загрузку материалов в различной последовательности и при любом сочетании (по усмотрению технологического персонала).

К наиболее существенным преимуществам БЗУ «HydroMech Top» можно отнести следующее:

- простота и надежность конструкции;
- компактность устройства;
- доступность основных механизмов для обслуживания и ремонта;
- широкий рабочий диапазон угла наклона распределительного лотка;
- точность и скорость позиционирования угла наклона распределителя шихты за счет использования гидропривода;
- оригинальная конструкция подвески распределительного лотка дает возможность формирования осевой «отдушины» в широких пределах;
- исключение возможности неконтролируемого «пересыпания» материала при больших значениях угла наклона лотка и расхода шихты при загрузке в печь;

- выполнение газоуплотнительных клапанов без резиновых или других каких-либо не металлических уплотнений (плотность обеспечивается притертыми поверхностями седла и тарели), позволяет работать на неохлажденном сырье;
- возможность использования различных энергоносителей в системе охлаждения;
- увеличенный ресурс эксплуатации распределителя шихты.

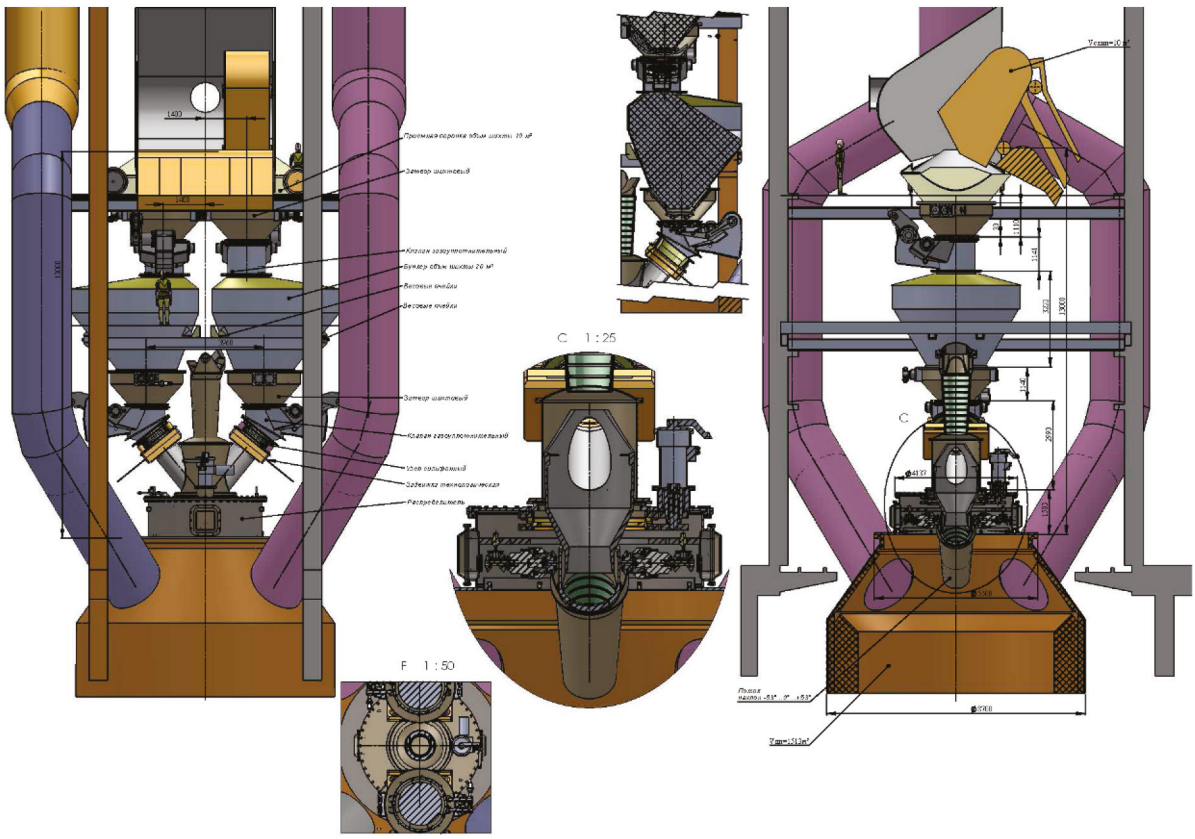


Рис. 7а. Бесконусное загрузочное устройство (двухтрактовое)

Устойчивая работа доменной печи при качественном распределении материалов на колошнике способствует повышению степени использования газового потока на 3,0–3,5%, с соответствующей экономией кокса 10–15 кг/т чугуна и повышением производительности на 2,5–3,0%.

В настоящее время специалистами ряда металлургических предприятий высказана заинтересованность в оснащении разливочных машин гидравлическими кантовальными манипуляторами.

Гидравлический кантовальный манипулятор для разливочной машины разработан компанией «ДНЕПРОГИДРОМАШ» впервые (рис. 8) и основывается на опыте эксплуатации подобных механизмов для разливки ферросплавов.

Гидравлический манипулятор, по техническим характеристикам и технологическим возможностям, представляет собой простой и надежный механизм в части кинематической схемы, где учтены все возможные нагрузки на крюк, колонны и балки, а также в части обеспечения требуемых усилий гидравлическими приводами. При этом предусмотрена безопасная процедура действий в случае нестандартной ситуации (при обесточивании).

Основным преимуществом является простота и надежность конструкции, ремонтопригодность, безопасность эксплуатации.

Гидравлический кантовальный манипулятор ковша, предназначен для ковшей вместимостью до 140 т.

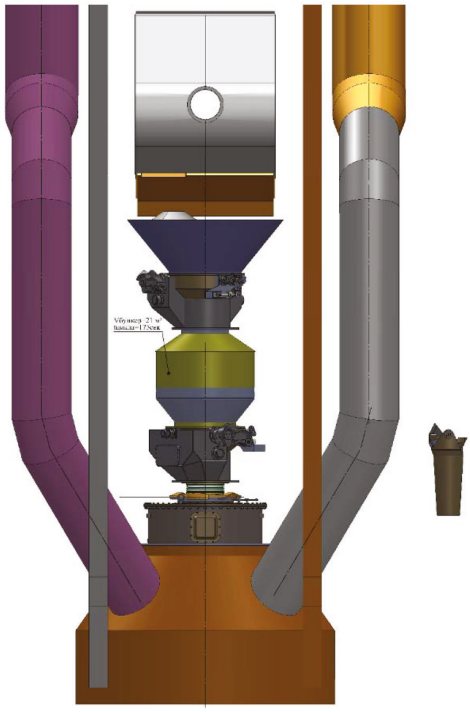


Рис. 7б. Бесконусное загрузочное устройство (однотрактовое)

Рис. 8. Гидравлический манипулятор

Привод манипулятора — гидравлический, в его конструкции используется два гидроцилиндра.

Система управления кантователем обеспечивает равномерную интенсивность слива чугуна при различных углах наклона ковша и скорости движения ленты, соответствующей заданной производительности машины.

Применение в составе разливочной машины кантовального манипулятора, в сравнении с традиционной кантовальной лебедкой, обеспечит ряд преимуществ:

- существенное снижение капитальных затрат на строительную часть проекта, а также снижение текущих расходов на обслуживание в процессе эксплуатации.
- для кантовального манипулятора не требуется громоздких, высотных строений. Возможно его размещение на открытой площадке;
- исключается необходимость применения грузоподъемных механизмов с крупногабаритными полиспастами и канатами;
- благодаря системе управления с пропорциональными гидравлическими распределителями обеспечивается плавность наклона ковша с синхронизацией скорости движения лент разливочной машины и согласованным положением ковша. Это позволяет осуществлять равномерный слив чугуна из ковша и полное заполнение изложниц расплавленным чугуном, что обеспечивает максимальную производительность работы;
- конструкцией кантовального манипулятора предусмотрена защита гидравлических приводов от воздействия высоких температур прямого излучения жидкого чугуна;
- обеспечивается высокая надежность конструкции и безопасность при эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компания «Днепрогидромаш» продолжает работу по совершенствованию конструкций машин для обслуживания горна доменных печей, их качества, а также работает над созданием новых образцов оборудования для металлургических предприятий и всего горно-металлургического комплекса.

Э.А. Вислогузова, Л. Фолько, Р.А. Чеглов, Д. Палмизано, «Seven Refractories»

ВИДЕНИЕ ОГНЕУПОРНОЙ ФУТЕРОВКИ В ЗАПЛЕЧИКАХ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Доменная печь (ДП) является одним из наиболее длительно эксплуатируемых агрегатов для выплавки жидкого металла, в течение срока эксплуатации которого оптимально рассчитанный профиль футеровки претерпевает значительные искажения, особенно в зонах повышенного воздействия факторов эксплуатации. Неравномерный и интенсивный износ определённых зон футеровки нарушает термодинамические условия в печи, что приводит к затруднению дальнейшей эксплуатации печи и управлению технологическими параметрами плавки. В таких случаях возникает необходимость замены футеровки с остановкой печи и потерями производства.

В последнее время наблюдается тенденция увеличения производительности, т.е. выплавки чугуна, на доменной печи. Решение этого вопроса невозможно без повышения стойкости футеровки путем улучшения качества применяемых огнеупорных материалов.

Наиболее изнашиваемой областью футеровки доменной печи является нижняя часть шахты, в особенности, — зона заплечиков. Основными причинами износа этой зоны является химическое воздействие шлаков, паров щелочей, углекислый газ CO, цинка, значительные колебания температур и абразивный износ за счёт опускания шихты. При увеличении производства доменной печи, т.е. при резком форсировании, износ футеровки также возрастает.

В настоящее время условия службы огнеупорной футеровки в нижней части шахты осложнились с внедрением пылеугольного топлива (ПУТ), которое способствует интенсификации тепловых процессов доменной печи. Использование ПУТ сопровождается усилением механического, абразивного, химического и теплового воздействия шихты и газов на футеровку.

В связи с этим, как правило футеровка нижней части шахты, в том числе и заплечиков, в наибольшей степени подвергается износу и фактически определяет срок службы доменной печи.

Огнеупоры в зоне заплечиков помимо вышеуказанных испытывают значительные, длительные по времени механические нагрузки от массы столба шихты, опирающихся на огнеупоры этой зоны. Более того идёт само давление верхней кирпичной футеровки на нижние слои, а также не маловажно давление самой печи, которая может создавать давление до 15 тонн на метр квадратный. Поэтому изделия в этой зоне должны обладать высокими показателями прочности при высоких температурах, не деформироваться, быть устойчивыми к ползучести при сжатии (крипу).

Традиционно для футеровки этой зоны используются формованные огнеупоры алюмосиликатного состава со все более возрастающим содержанием оксида алюминия. Однако, при постоянных нагрузках, при высокой температуре службы таких огнеупоров обнаруживается деформация, которая уменьшается с возрастанием содержания оксида алюминия, вплоть до корундовых, но корундовые огнеупоры, имея в несколько раз большую устойчивость к деформации по сравнению с алюмосиликатными огнеупорами, имели существенный недостаток: в процессе службы корундовые огнеупоры в присутствии щелочей из-за структурных изменений оказались неустойчивыми и разрыхлялись в футеровке. Изделия на муллитовой и муллито-корундовой связке оказались предпочтительнее.

Дальнейшее увеличение высокотемпературной прочности огнеупоров, используемых в футеровке ДП, происходило за счёт использования карбида кремния в шихте, то есть в составе алюмосиликатных огнеупоров.

Общеизвестно, что карбид кремния обладает исключительной прочностью, приближающейся к прочности алмаза, высокими показателями плотности и теплопроводности, огнеупорностью, устойчивостью к химическому и абразивному износу, различным газам, кислотам, шлакам и металлургическим расплавам. По некоторым данным SiC имеет температуру плавления около 2950 °С. По другим источникам карбид кремния не плавится, а диссоциирует. Изделия на основе карбида кремния не деформируются до 1700°С, т.е. не имеют роста и усадки. Таким образом, эти изделия наилучшим образом подходят к использованию в зоне заплечиков доменной печи.

Добавка SiC в шихту, то есть состав алюмосиликатных изделий значительно улучшает физико-химические свойства огнеупоров, поэтому постепенно увеличивалось количество добавки, и в настоящее время содержание карбида кремния в огнеупорах достигает 70–75%. Это уже новый класс огнеупоров — карбидкремниевые на алюмосиликатной связке. Деформационные свойства таких огнеупоров практически в несколько раз выше по сравнению с другими, ранее используемыми в ДП.

Особо ценным комплексом свойств обладают карбидкремниевые огнеупоры на нитрид-кремниевой и окси-нитрид-кремниевой связках. Но изготовление этих огнеупоров технически сложно и достаточно дорого. В связи с этим наиболее широко в настоящее время используются карбидкремниевые огнеупоры на алюмосиликатной связке высокоглинозёмистого состава. Безусловно новый тип огнеупоров обеспечил более высокую и надёжную стойкость, но и увеличились затраты при производстве формованных изделий этого типа и, следовательно, затраты конечного потребителя.

Для преодоления данной проблемы необходимо было снизить производственные затраты и у производителя и у потребителя. Основой решения была разработка технологии производства огнеупорных бетонов.

Неформованные огнеупоры уже применялись достаточно широко, Это — различные по химическому составу и назначению порошки и набивные, наливные массы и торкретмассы, мертеля, обмазки, покрытия и т.д. Доля неформованных огнеупорных материалов постоянно росла и продолжает расти, вытесняя традиционные обжиговые и без-обжиговые кирпичи.

Существенным этапом в дальнейшем увеличении применения неформованных огнеупоров явилась разработка целой серии огнеупорных бетонов, в том числе и с содержанием карбида кремния.

Бетоны с содержанием SiC обладают практически теми же характеристиками, что и формованные обожженные карбид-кремниевые изделия, и стали использоваться в области футеровки агрегатов черной металлурги и, в частности, в агрегатах доменного производства.

Карбидкремниевые огнеупоры, как формованные, так и неформованные содержат каркас из крупных зёрен карбида кремния различных фракций в том числе и крупных, и мелкодисперсных частиц связующего вещества, в основном высокоглинозёмистого состава, которое состоит из стекла и муллита.

Крупные зёрна наполнителя являются носителями свойств кристаллов огнеупорного вещества. Чем крупнее зёрна кристаллов, тем больше сопротивление ползучести, т.е. высокотемпературной деформации.

Чем меньше стекла, тем выше устойчивость к ползучести в процессе длительной службы. Поскольку количество стеклофазы, в первую очередь, определяется количеством связки, уменьшение последней будет повышать устойчивость огнеупора к ползучести. Однако крупные зерна SiC плохо спекаются и для получения прочных формованных изделий необходимо применять в большем количестве, чем в бетонах, вяжущие материалы, которые привносят в изделия и увеличивают в них количество стеклофазы.

В формованных изделиях уменьшение количества связки проблематично, поскольку сформовать плотные изделие из жесткой и абразивной SiC шихты затруднительно. Количество связки, как правило, составляет не менее 25%.

В бетонах можно использовать более крупные зерна заполнителя, чем при формовании изделий. Кроме этого, в бетонах за счет использования в небольших количествах добавок, для повышения реологических свойств, можно уменьшить количество высокоглинозёмистой связки, а, следовательно, стеклофазы или даже заменить часть её на мелкозернистый SiC, сохраняя параметры плотной укладки бетона.

Существенным преимуществом использования бетонов является отсутствие швов в кладке. Процесс укладки бетона поддаётся механизации, в то время, как кладка штучных изделий, не поддается механизации и требует труда квалифицированных каменщиков, который при использовании бетонов заменяется на труд монтажников. Значительно сокращаются сроки выполнения футеровки. Конечно, это зависит от способа укладки бетона с опалубкой или методом шоткретинга. В данном случае выбор за потребителем.

Служба карбидкремниевых формованных огнеупоров и бетонов такого же состава проходит с определённым отличием. Обжиг формованных карбидкремниевых изделий происходит, как правило, в окислительной атмосфере, поэтому фазовый состав обожженных изделий характеризуется соответствующими оксидными фазами компонентов огнеупора (шихты).

Именно эти фазы становятся неустойчивыми в восстановительной среде, характерной для внутреннего пространства ДП. Это связано с тем, что при производстве формованных изделий при технологической операции обжига в связке образуется жидкая фаза, из которой при охлаждении изделий по выходу из обжиговой печи, кристаллизуются минералы. В службе таких изделий идёт обратный процесс — растворение этих минералов во вновь образующейся жидкой части связки. Эти процессы приводят к изменению структуры изделий и снижению прочностных свойств футеровки.

В отличие от формованных изделий в бетонах структура и фазовый состав создаются в термодинамических условиях, соответствующих условиям эксплуатации. Это позволяет свести к минимальным изменениям структуры бетона в процессе длительной службы, а меньшее содержание стеклофазы обуславливает более высокую термостойкость по сравнению с формованными изделиями такого же химико-минералогического состава.

Тем самым мы можем предположить, что по этой теории у бетонов должна быть выше прочность при высоких температурах, а у формованных обожжённых изделиях — выше в холодном состоянии за счёт стеклофазы.

Таким образом, выбор карбидкремниевых огнеупоров формованных или неформованных для футеровки заплечиков должен определятся техническими возможностями проведения ремонта, наличием квалифицированных каменщиков, допустимыми сроками ремонта и, в целом, экономическим эффектом от применения тех или иных огнеупоров.

Е. А. Кондратьев, В. В. Горбунов,
Богдановичское ОАО «Огнеупоры»

ПРОДУКЦИЯ БОГДАНОВИЧСКОГО ОАО «ОГНЕУПОРЫ» ДЛЯ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

В 2016 году Богдановичское ОАО «Огнеупоры» отметило свое 78-летие. История предприятия неотрывно связана с историей становления и развития огнеупорной отрасли всей страны. За этот период был пройден путь от начала освоения Троицко-Байновского месторождения огнеупорных глин и выпуска рядового шамота до одного из самых мощных в России производителей огнеупорной продукции практически всех типоразмеров и модификаций.

Создание качественной огнеупорной продукции отвечающей всем пожеланиям заказчиков во все времена считалось сложной задачей, но в последние годы в связи с мощным развитием металлургического комплекса, и особенно доменного производства, потребители стали предъявлять к огнеупорной продукции особо жесткие требования. Данные притязания, обусловлены в первую очередь постоянным повышением производительности доменных печей за счет использования комплекса мощных технологических воздействий, основными из которых является повышения интенсивности дутья и внедрение новых высокоэффективных проектов.

Чтобы своевременно выполнять жесткие требования металлургов, быть постоянно востребованным на рынке огнеупорной продукции, ОАО «Огнеупоры» непрерывно ведет работу по исследованию, разработке и внедрению новых видов огнеупорной продукции, ориентируясь не только на изменения, происходящие у потребителя, но и на новые направления развития науки, техники и производства.

Большое разнообразие применений огнеупорных материалов отражается и на спектре новых продуктов ОАО «Огнеупоры», таких как:

- **формованные продукты:** гидравлически прессованный кирпич, вибролитые изделия;

- **неформованные продукты:** огнеупорные бетоны, набивные массы для всех типов желобов, крышек аспирации;
- **функциональные продукты:** узкоспециализированные единицы, которые производятся под конкретные требования технологического процесса.

Одними из таких продуктов, являются формованные изделия под маркой BOZ применяемые в доменной печи: в зонах шахты, распара, заплечиков и горна. Продукты обладают низким содержанием Fe_2O_3, низкой пористостью и отличной высокотемпературной прочностью, что обеспечивает высокую стойкость в эксплуатации. Физико-химические параметры огнеупоров под маркой BOZ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-химические параметры формованных огнеупоров марки BOZ

Наименование показателя	BOZ-HA 45/HR50	BOZ-HA 45/HR40	BOZ-FC 43/HR25
Массовая доля Al_2O_3, %, не менее	45	45	43
Массовая доля Fe_2O_3, %, не более	1,5	1,5	1,5
Огнеупорность, °С, не ниже	1770	1770	1770
Предел прочности при сжатии, Н/мм, не менее, для изделий 5, 6, 7, 8 остальных	 40 70	 40 70	 40 70
Открытая пористость, % не более	12	12	12
Остаточное изменение размеров, % при температуре — 1450 °С	0,2	0,2	0,2
Термическая стойкость (1300 °С — вода), число теплосмен, не менее	50	40	25

Предприятие также нацелено на наращивание объемов перспективных видов огнеупорной продукции, позволяющих конкурировать на равных, не только с отечественными, но и с зарубежными производителями. К таким видам продукции относятся желобные массы и наливные бетоны для крышек аспирации. На предприятии создан и стремительными темпами развивается новый участок по выпуску данных неформованных огнеупорных материалов.

В основной ассортимент продукции цеха входит производство желобных масс различного состава и назначения на основе муллита, боксита, корунда, андалузита и карбида кремния. Огнеупорная продукция изготавливается на современном оборудовании и по технологии ведущих европейских производителей. Для получения отличных служебных характеристик, при производстве бетонных смесей и масс используются компоненты известных зарубежных фирм. Физико-химические параметры желобных масс для рабочего слоя, арматурного слоя и крышек аспирации всех типов желобов приведены в таблицах 2–6.

Таблица 2. Физико-химические параметры наливных масс для рабочего слоя главных желобов

Наименование продукта		BOZ CAST WS3	BOZ CAST WSH
Применение		Зона металла	Зона шлака
Химический состав, %	Al_2O_3	> 68	>= 20
	SiO_2	>=2,0	>= 2,0
	SiC	>= 24	>= 65
	C	>= 2,0	>= 3,0
Кажущаяся плотность, г/см^3	1450 °С	>= 2,9	>= 2,7
ТКЛР, %	1450 °С	0,18–0,22	0,17–0,22
Предел прочности при сжатие, (Н/мм^2)	1450 °С	> 70	> 80

Таблица 3. Физико-химические параметры наливных масс для рабочего слоя транспортных желобов

Наименование продукта		BOZ CAST WST	BOZ CAST WSH1
Применение		Зона металла	Зона шлака
Химический состав, %	Al_2O_3	>= 68	>= 58
	SiO_2	>=4,0	>= 3,0
	SiC	>= 11	>= 22
	C	>= 1,0	>= 2,0
	MgO	–	–
Кажущаяся плотность, г/см^3	1450 °C	>= 2,7	>= 2,6
ТКЛР, %	1450 °C	0,18–0,23	0,11–0,18
Предел прочности при сжатие, (Н/мм^2)	1450 °C	>= 75	>= 80

Таблица 4. Физико-химические параметры наливных масс для рабочего слоя качающихся желобов

Наименование продукта		BOZ CAST WST	BOZ CAST WSK1
Применение		Дно желоба	Стена желоба
Химический состав, %	Al_2O_3	>= 60	>= 90
	SiO_2	>=5,0	–
	SiC	>= 20	–
	C	>= 1,0	–
	MgO	–	4,0
Кажущаяся плотность, г/см^3	1450 °C	>= 2,7	>= 3,0
ТКЛР, %	1450 °C	0,18–0,25	0,011–0,012
Предел прочности при сжатие, (Н/мм^2)	1450 °C	>= 70	>= 78

Таблица 5. Физико-химические параметры наливных масс для арматурного слоя желобов

Наименование продукта		BOZ CAST-70K
Химический состав, %	Al_2O_3	> 75
	Fe_2O_3	<=2,0
	CaO	<= 2,0
	C	>= 2,0
Кажущаяся плотность, г/см^3	1580 °C	2,7
Температура применения, °C не более		1700
Предел прочности при сжатие, (Н/мм^2)	1580 °C	> 110

Таблица 6. Физико-химические параметры наливных масс для крышек аспирации

Наименование продукта		BOZ CASTHS2	BOZ CASTWS2-1
Способ укладки		Виброукладка	Виброукладка
Химический состав	Al_2O_3	60	65
	SiO_2	32	8
	SiC	–	18

Продолжение таблицы 6

Наименование продукта		BOZ CASTHS2	BOZ CASTWS2-1
Кажущаяся плотность, г/см^3	1450°C	2,47	2,63
Изменение линейных раз-ров (%)	1450°C	+0,03	+0,12
Прочность (MPa)	110°C	65	23
	1450°C	95	96
Добавление воды (%)		5,0~6,5	7,0~8,0

Отличительными особенностями бетонов марки BOZ CAST для всех типов желобов и крышек аспирации заключаются в следующем:

- Высокая устойчивость к коррозии от расплавленного чугуна за счет содержания более чистого и высокоогнеупорного элемента (Al2O3)
- Высокая устойчивость к образованию трещин, за счет высокого содержания SiC.

Компания видит будущее не только в постоянном обновлении продукции способной быстро и полностью удовлетворять потребности клиентов. Но и учитывая конъюнктуру современного огнеупорного рынка, решать проблемы потребителей — комплексным подходом — «под ключ», включающим в себя: разработку дизайн-проекта, поставку опытной огнеупорной продукции, шеф-монтажом футеровочных работ всех типов тепловых агрегатов с последующим постоянным мониторингом их состояния во время эксплуатации.

Расширение номенклатуры производимой продукции, особенно неформованной предполагает ее успешную реализацию только при условии наличия у потребителей необходимого оборудования — бетоносмесителей, торкрет-установок. Это особенно актуально при переводе на более современные технологии футеровки тепловых агрегатов морально и физически устаревших цехов. Богдановичское ОАО «Огнеупоры» является единственным официальным представителем фирмы «VELCO GmbH» в России специализирующийся на поставке эксклюзивного оборудования необходимого для замешивания и нанесения новых видов огнеупорных бетонов и масс. Взаимовыгодным примером такого сотрудничества служат внедрение качественно новых технологий футеровок тепловых агрегатов с параллельной поставкой необходимого качественного оборудования на некоторые предприятия РФ.

Предприятие обладает мощными интеллектуальными ресурсами и возможностями, на базе ЦЗЛ, создан и успешно работает инженерно-технический центр (ИТЦ). Центр постоянно проводит научно-исследовательские работы по изучению свойств огнеупоров и механизмов физико-химических процессов при высоких температурах службы.

Одним из самых важных направлений деятельности, заданные маркетинговой стратегией ОАО «Огнеупоры» является обеспечение постоянного роста объемов продаж продукции. Основные направления включают в себя:

- оптимальный и дифференцированный подход к ценообразованию продукции;
- создание торгово-технических представительств;
- расширение географии дистрибьюторской сети;
- диверсификация производства по отраслям промышленности и регионам.

Также, четко обозначены следующие основные направления деятельности, обеспечивающие эффективное развитие компании:

- реализация производственной программы — повышение конкурентоспособности за счет достижения оптимального соотношения между себестоимостью и качеством продукции;
- реализация инвестиционной программы — приоритетные направления капиталовложений, минимизация риска и максимизация доходности.

В целом, менеджментом компании обозначена основная стратегическая цель развития Богдановичского ОАО «Огнеупоры»: увеличение доли предприятия на рынках огнеупорной продукции и услуг России и стран ближнего и дальнего зарубежья.

А.Ю. Глазер, ООО «ГЕА Процессный инжиниринг»

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ GEA ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА ПРОМЫШЛЕННЫМИ ВЫБРОСАМИ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

GEA Group AG — международный машиностроительный концерн со штаб-квартирой в городе Дюссельдорф (Германия), в настоящее время является одним из крупнейших поставщиков инновационного оборудования и технологий и имеет подразделения более чем в 50 странах мира. Объём продаж компании более 4,6 миллиардов евро, акции GEA Group торгуются на фондовой бирже в Франкфурте и входят в сводный индекс STOXX® Europe 600.

Компания GEA начала внедрять системы контроля выбросов в 1913 году, построив первый электрофильтр для улавливания частиц пыли.

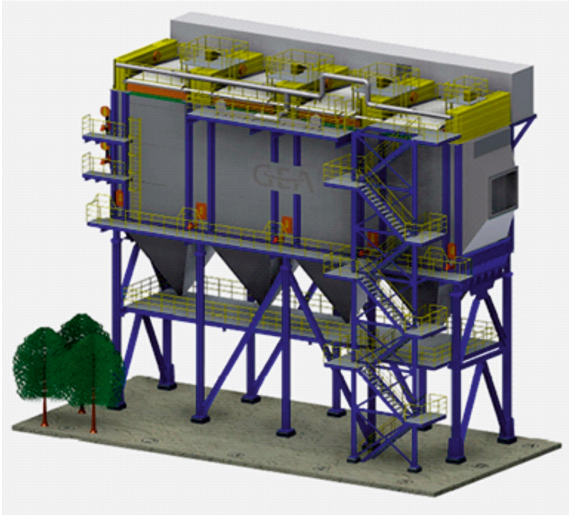


Рис. 1. Электрофильтр GEA

Сегодня мы являемся поставщиком комплексных систем для промышленной очистки газов, включая проектирование, ввод в эксплуатацию и техобслуживание. По всему миру мы поставили более 15 000 систем газоочистки для черной и цветной металлургии, стекольной, цементной, химической промышленности, а также установок каталитического крекинга на нефтеперерабатывающих заводах.

Наряду с производством чугуна и стали, задачи по охране окружающей среды и энергосбережению являются неотъемлемой частью технологического процесса. Компания GEA предлагает эффективные решения по очистке воздуха при сохранении низких капитальных и эксплуатационных затрат.

В черной металлургии мы предлагаем решения по следующим направлениям:

- Очистка технологических газов (доменный, конвертерный, коксовый).
- Пылеулавливание.
- Кондиционирование газа.
- Сухая, полу-сухая и мокрая десульфуризация.
- Денитрификация.
- Улавливание диоксинов, фуранов.
- Улавливание кислотных компонентов.
- Регенерация тепловой энергии.

Имея более чем 100-летний опыт работы в области газоочистки, мы готовы решать задачи с учетом особенностей именно Вашего производственного процесса.

ПРОИЗВОДСТВО АГЛОМЕРАТА И ОКАТЫШЕЙ

Очистка технологических газов агломерационного производства от пыли в сухом горизонтальном электрофильтре. Остальные загрязняющие вещества, такие как SO_2, HF, PCDD/F и тяжелые металлы, улавливаются газоочистными установками следующих типов:

- Сухой потоковый абсорбер с использованием гидратной извести и активированного угля. Это техническое решение состоит из потокового реактора, узла рециркуляции и низконапорного рукавного фильтра
- Распылительный абсорбер с применением известковой суспензии и последующее улавливание пыли в низконапорном рукавном фильтре

Рис. 2. Очистка газов на аглофабрике

КОКСОХИМИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Очистка технологического газа от смолы с использованием вертикальных мокрых электростатических фильтров.

Рис. 3. Мокрые электрофильтры коксового газа

ЛИТЕЙНЫЙ ДВОР И ШИХТОПОДАЧА

Вторичные выбросы, образующиеся при выпуске чугуна, а также при переливе чугуна из ковшей в конвертер собираются при помощи аспирационных укрытий и очищаются в низконапорном рукавном фильтре.

Рис. 4. Низконапорный рукавный фильтр с искроулавливателем для системы аспирации литейного двора и бункерной эстакады

Низконапорный рукавный фильтр используется преимущественно для расхода газа более 200 000 м³/ч.

Ключевые преимущества рукавных фильтров GEA:

- Низкий перепад давления: 10–12 мбар
- Малый расход энергии для очистки рукавов:
  - Давление воздуха для очистки всего от 0,5 до 0,8 бар.
  - Удельная энергия всего 2.0 Вт/м² поверхности фильтра.
- Отсутствие компрессоров и сушилки. Сжатый воздух подается простыми воздуходувками.
- Малое количество движущихся деталей. Одна система очистки (1 мембранный клапан, 1 привод для очистной лопасти) может обслуживать до 1200 рукавов длиной до 10 метров.
- Простой доступ для обслуживания и ремонта, доступ ко всем сменным частям без демонтажных работ.

ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ ПЕЧЬ

Первичные газы охлаждаются наружным воздухом, смешиваются со вторичными газами от укрытия и очищаются в низконапорном рукавном фильтре.

ДОМЕННАЯ ГАЗООЧИСТКА

Системы очистки колошникового газа состоят из пылеуловителя или циклона, предназначенных для улавливания крупной пыли, и скруббера с регулируемым кольцевым зазором (скруббер Bischoff) для улавливания мелкой пыли и регулирования давления на колошнике.

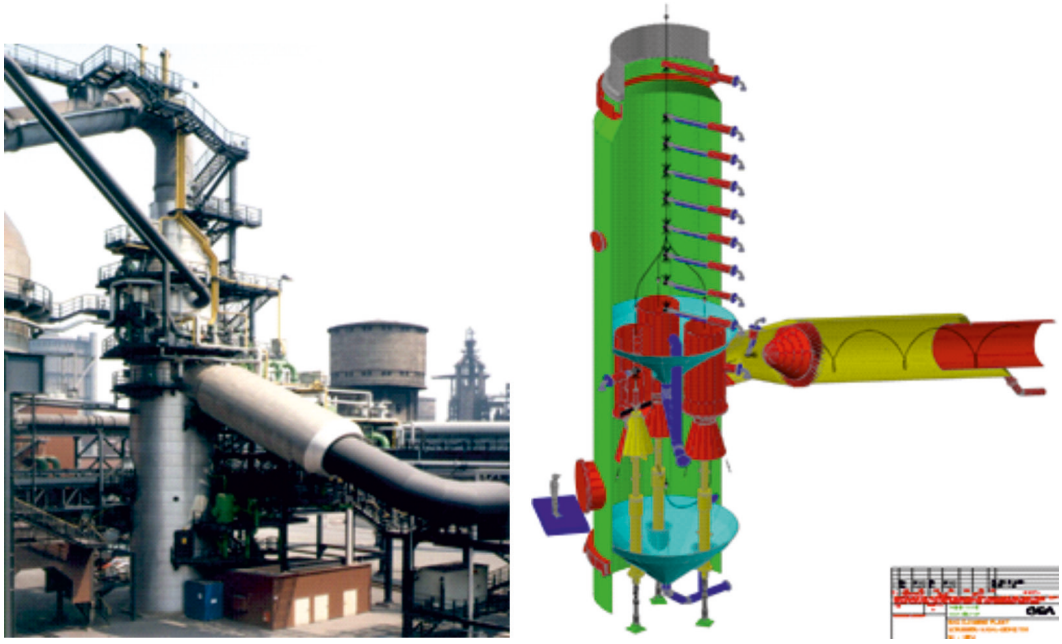


Рис. 5. Скруббер Bischoff с каплеуловителем

Ключевые преимущества скруббера Bischoff:

- Длительный срок службы.
- Высокая эффективность.
- Минимальное тех. обслуживание.
- Компактность установки.
- Очистка от пыли до уровня 5 мг/нм^3.

КОНВЕРТЕРНАЯ ГАЗООЧИСТКА

При производстве стали образуется большое количество горячих дымовых газов с высокой запыленностью.

Тепловая энергия регенерируется при котла-утилизатора.

Пыль улавливается в сухом электрофильтре с круглым корпусом (процесс LURGI Thyssen). Уловленная пыль может быть повторно использована при производстве стали. На следующем технологическом происходит хранение и дальнейшее использование чистого газа с большим содержанием CO.

Рис. 6. Сухая очистка конвертерных газов по технологии Lurgi-Thyssen

Ключевые преимущества процесса LURGI-Thyssen:

- Минимизация энергозатрат.
- Высокая степень рекуперации пара и газа.
- Очень низкое содержание пыли в очищенном газе.
- Сухой процесс с получением сухой пыли.
- Отсутствие необходимости в очистке сточных вод и обработке шлама.

Также мы предлагаем в качестве альтернативы сухой очистке конвертерных газов, мокрую систему очистки на основе скруббера Bischoff.

ОЧИСТКА ИЗВЛЕЧЕННОГО ГАЗА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ

Перед использованием в газовой турбине, коксовый, доменный и конвертерный газ должны быть дополнительно очищены в мокром горизонтальном электрофильтре для предотвращения износа лопаток турбины.

РЕГЕНЕРАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Регенерация тепла от охладителя агломерата при помощи масляного контура для подогрева воздуха горения или производства электроэнергии.

GEA Bischoff предлагает системы рекуперации энергии, основанные на органическом цикле Ренкина (ORC), что является наиболее эффективным решением для данного применения.

Ю.И. Цыгулев, ООО «Технология-М»

СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВДУВАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Опыт применения технологии вдувания ПУТ четко обозначил проблему, связанную с увеличением тепловых нагрузок на холодильные плиты, возникшую в результате снижения расхода кокса, а так же низкого качества подаваемых в печь железорудных материалов, и, как следствие, плохой газопроницаемости шихты. Это приводит к перераспределению потоков газа, увеличению вероятности образования периферийного хода, смещению зоны воздействия максимальных тепловых нагрузок по высоте печи в зону заплечиков, распара, 1-го, 2-го рядов шахты. Воздействие этих негативных факторов предъявляют к системе охлаждения максимально высокие требования по обеспечению эффективности и бесперебойности её работы.

Воздействие высоких тепловых нагрузок на неподготовленную систему охлаждения приводит к быстрому и обширному разрушению чугунных холодильных плит в области заплечиков и первых рядов шахты доменной печи. Объемы разрушения показаны на фотографии.

В условиях работы с повышенными тепловыми нагрузками крайне важно обеспечить стабильную циркуляцию и надежный теплоотвод от холодильных плит. Это особенно опасно при сходе гарнисажа, когда холодильная плита подвержена резкому воздействию максимальных тепловых нагрузок, которые приводят к возникновению плёночного кипения, когда слой пара между жидкостью и стенкой останавливает отвод тепла с дальнейшим прогаром плиты.

Причины возникновения таких высоких тепловых нагрузок на холодильные плиты, прежде всего, вызваны комплексом проблем, связанных с технологией ведения доменной плавки, с отсутствием необходимой предварительной подготовки загружаемого в печь сырья. Плохое качество шихтовых материалов, отсутствие возможности управления

точным распределением шихты по поверхности засыпи доменной печи, интенсификация процесса доменной плавки с превышением проектных показателей по суточной производительности чугуна и по вдуванию пылеугольного топлива приводят к нарушению газодинамического режима работы доменной печи, пониженной газопроницаемости, усилению периферийного потока газов и, как следствие, перегреву футеровки и холодильных плит с последующим выходом их из строя.

Распространение технологии вдувания ПУТ привело к необходимости модернизации неподготовленных систем охлаждения. На предприятиях черной металлургии Украины, как правило, модернизация осуществляется в рамках проведения ремонта доменной печи и гораздо реже при осуществлении полномасштабного нового строительства. Решения, применяемые для осуществления модернизации, должны обеспечить короткий срок реализации и максимальную эффективность работы при минимальных капитальных затратах.

ООО «М Технология» занимается решением этой задачи, реализуя свои проекты на доменных печах ПАО «Запорожсталь», ЧАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», ЧАО «Енакиевский металлургический завод», ЧАО «МК «АЗОВСТАЛЬ».

Основная задача современной системы охлаждения — создать условия для формирования и удержания гарнисажа на охлаждаемой поверхности и обеспечивать быстрый отвод тепла при его сходе, способствовать продлению кампании доменной печи до капремонта 1-го разряда порядка 15 лет.

Широкое применение на территории Украины получили 4 типа систем охлаждения заплечиков и шахты:

1. Система охлаждения технической водой. Неприемлема в условиях вдувания ПУТ. При перегреве неподготовленной техводы на поверхностях теплообмена образуются отложения накипи, ухудшающие теплообмен.
2. Система испарительного охлаждения (СИО) с естественной циркуляцией. Применима только в качестве аварийного режима охлаждения и является альтернативой установке насосов с дизельным приводом. Основные недостатки: СИО имеет низкие скорости циркуляции, большая вероятность возникновения плёночного кипения.
3. Система охлаждения «горячей» химводой с принудительной циркуляцией.
4. Система охлаждения «холодной» химводой в замкнутом контуре.

Из перечисленных систем охлаждения эффективно противостоять высоким тепловым нагрузкам в условиях применения технологии ПУТ способны только система охлаждения «горячей» химводой с принудительной циркуляцией и система охлаждения «холодной» химводой в замкнутом контуре при условии оснащения их необходимыми средствами обеспечивающими надежность работы, а именно:

- качественные холодильные плиты;
- качественные огнеупорные материалы;
- современная АСУ ТП с сигнализацией отклонения от рабочих параметров;
- обеспечение скорости охлаждающей воды в каналах холодильных плит V = 1,5÷2 м/с.
- использование в циркуляционном контуре подготовленной химочищенной деаэрированной воды.

Сравнение типов холодильных плит:

Самым современным решением для защиты кожуха доменной печи в зоне воздействия максимальных тепловых нагрузок и значительного абразивного износа является применение медных холодильных плит, охлаждаемых химочищенной деаэрированной водой в комбинации с высокотеплопроводными огнеупорными материалами, стойкими к механическим воздействиям.

Применение чугунных холодильных плит в зоне воздействия высоких тепловых нагрузок существенно снижает надежность системы охлаждения в независимости от её типа. При заливке стальной трубки в чугунные холодильные плиты между внешней стенкой трубы и телом холодильника имеется зазор S = 0,3÷0,8 мм, который появляется в процессе чугунной отливки при выгорании маршалитовой обмазки труб холодильника. Многослойная структура чугунного холодильника (чугунное тело, стальная трубка со стенкой, подвергнутой процессу науглероживания в процессе производства холодильников), при резких воздействиях пиковых тепловых нагрузок приводит к образованию трещин как в трубках охлаждения, так и в чугунном теле холодильника.

Отложения на внутренней поверхности трубки чугунной холодильной плиты при охлаждении технической водой

Образование трещин в водоохлаждаемой трубке и теле чугунной холодильной плиты

Результаты гидравлических и теплотехнических расчетов контуров охлаждения и распределения температур в чугунной холодильной плите при сходе футеровки на стороне плиты, обращенной в пространство печи, показывают, что температура может достигать 670°С. При наличии отложений на внутренней поверхности трубок толщиной до 2 мм градиент температур по толщине плиты достигает 400 °С. При этом возникают такие термонапряжения, которые приводят к образованию трещин и дальнейшему выходу плиты из строя. Из-за различия в материалах, сжатие и расширение происходит неравномерно, что способствует образованию трещин.

Высверленный водоохлаждаемый канал медной холодильной плиты

Футеровка медных холодильных плит карбидкремниевым кирпичом

Медные холодильники изготавливаются из горячекатаных слябов с просверленными каналами охлаждения круглого сечения. Рабочая поверхность холодильников фрезеруется для создания профиля «ласточкин хвост». Качественное охлаждение обеспечивается не только благодаря высокой теплопроводности меди, но и за счет однородной структуры холодильника. За счет меньшей толщины медных холодильников по сравнению с чугунными увеличивается полезный объем печи, при условии применения существующего кожуха.

Медные холодильные плиты обеспечивают образование устойчивого гарнисажа, что значительно снижает теплопотери в высокотемпературной зоне по сравнению с чугунными холодильниками. Наличие стабильного слоя гарнисажа предохраняет охлаждающие элементы от истирания подымающимися газами и опускающейся шихтой, а также увеличивает срок службы холодильников.

ООО «М-Технология» разработала конструкцию медных холодильных плит, позволяющую сохранить существующий кожух, при условии его пригодности для дальнейшей эксплуатации, что значительно сокращает время при проведении ремонтов ДП. Классический вертикальный медный холодильник имеет расположение выводов трубок в одной горизонтальной плоскости, медные холодильные плиты, разработанные для ремонта ДП4 ПАО «Запорожсталь», имеют расположение патрубков, позволяющее сохранить существующую разбивку отверстий кожуха, что позволит значительно сократить сроки ремонта.

Медный холодильник, изготовленный по дизайну ООО «М-Технология»

Классический вертикальный медный холодильник

При установке медных холодильных плит важным фактором является применение гибких соединений между выводами холодильных плит, для возможности эффективной компенсации тепловых расширений. В своих проектах мы используем металлорукава с быстросъемными соединениями и силиконовым покрытием для защиты рукава от прогаров во время сварочных работ, а также дальнейших тепловых и пылевых воздействий.

Продольный разрез литого стального холодильника

Применение быстросъемных соединений повышает ремонтоспособность системы охлаждения, позволяет при необходимости оперативно отключать либо подключать холодильную плиту к системе охлаждения.

Альтернативой применению медных холодильных плит, для организации надежного теплоотвода и обеспечения качественного охлаждения футеровки является применение стальных холодильников. Основная особенность стальных холодильных плит — отсутствие границы между залитой трубой и телом холодильника. Материал литого стального холодильника — низкоуглеродистая сталь с содержанием углерода 0,2÷0,3%.

При использовании любой, даже самой современной системы охлаждения, применение холодильных плит низкого качества делает невозможным обеспечение надежного теплоотвода, особенно при резком воздействии высоких тепловых нагрузок, что в результате приводит к выходу из строя системы охлаждения.

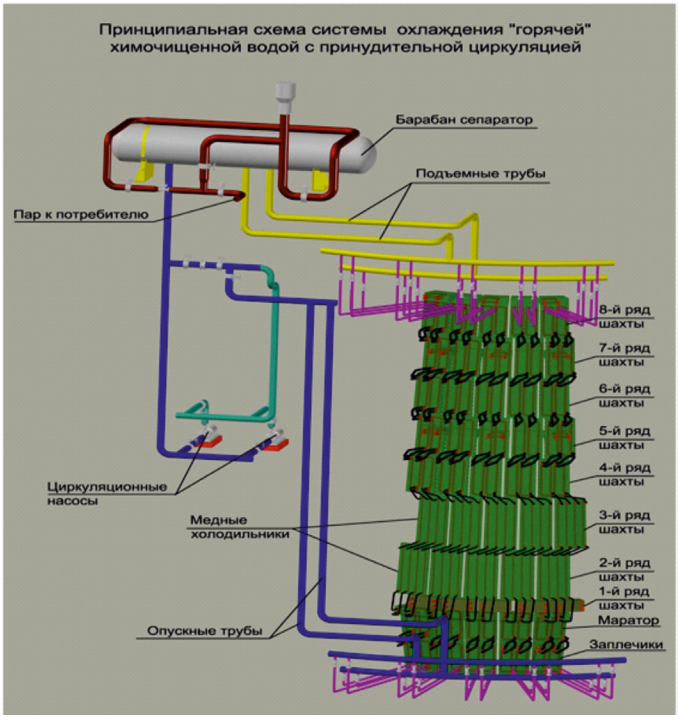
РЕШЕНИЯ, РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРИ КАПИТЕЛЬНОМ РЕМОНТЕ 2-ГО РАЗРЯДА ДП № 2 ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ»

В 2015 г. по проекту ООО «М Технология» на ПАО «Запорожсталь» был выполнен капремонт доменной печи № 2. Ввод в эксплуатацию ДП после капитального ремонта 2-го разряда осуществлен 23 апреля 2015 г.

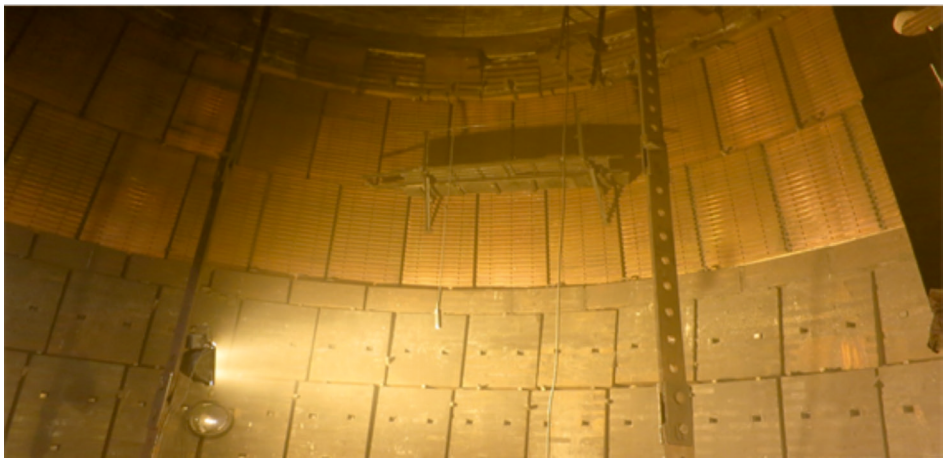
Решения, принятые при реконструкции системы охлаждения заплечиков и шахты ДП:

1. Установка вертикальных медных плит в 1-м и 2-м ряду шахты печи с заменой кожуха в этой зоне.
2. Применение карбидокремниевой футеровки в зоне заплечики–распар–шахта.
3. Система охлаждения «горячей» химически очищенной водой с принудительной циркуляцией.
4. Система автоматического управления, контроля и визуализации основных рабочих параметров системы охлаждения холодильных плит.

Принципиальная схема системы охлаждения, реализованная на ДП2 ПАО «Запорожсталь»:



Общий вид смонтированных холодильных плит ДП2:

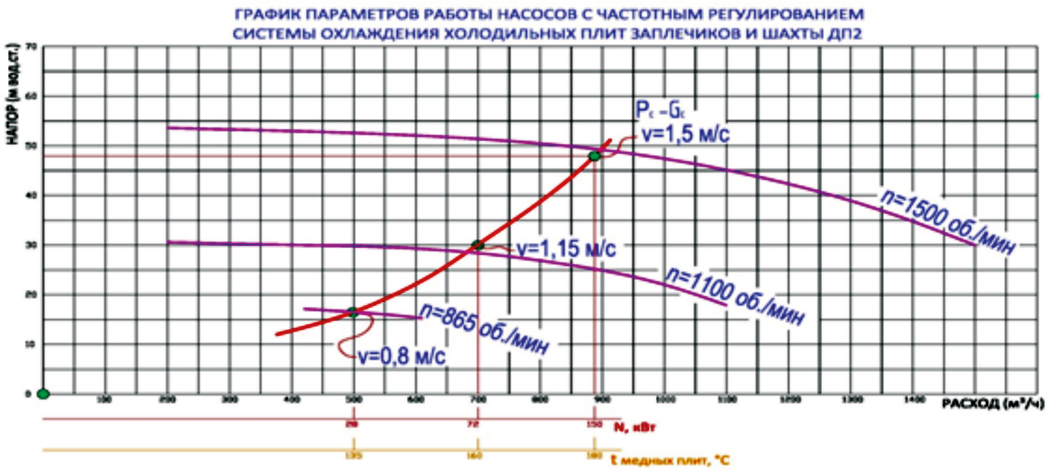


Система испарительного охлаждения с естественной циркуляцией заменена на систему охлаждения «горячей» химочищенной водой с принудительной циркуляцией. Принципиальное отличие этой системы заключается в том, что применение циркуляционных насосов позволило перенести точку вскипания воды из каналов охлаждения холодильных плит в подъемные коллектора. В охлаждающих каналах холодильных плит имеет место конвективный теплообмен при температуре ниже температуры кипения. Только при снижении давления в подъемных трубопроводах к барабанам-сепараторам происходит переход жидкости в пар. Горизонт достижения температуры кипения при данном давлении может быть изменен регулированием расхода воды посредством установленных на электродвигатели циркуляционных насосов частотных преобразователей.

Установка циркуляционных насосов позволила достичь оптимальных скоростей в контурах охлаждения V = 1,5 м/с, для сравнения — скорости при естественной циркуляции составляют порядка V = 0,2–0,35 м/с.

Предусмотрена возможность работы системы охлаждения в следующих режимах:

- охлаждение «горячей» химочищенной водой с принудительной циркуляцией;
- охлаждение с естественной циркуляцией (аварийный режим при обесточивании насосной станции);
- охлаждение технической водой (аварийный режим при отсутствии подачи подпиточной химочищенной воды).



При разработке системы охлаждения были применены запатентованные ООО «М Технология» решения по способу контроля теплового состояния холодильных плит с регулированием интенсивности их охлаждения.

Для автоматического регулирования интенсивности охлаждения холодильных плит заплечиков, маратора и шахты предусматривается частотная регулировка количества оборотов электродвигателей насосных агрегатов в зависимости от температуры тела медных холодильных плит. Для проверки характеристик работы насосов и наладки системы предусматривается использование показаний расходомеров на нагнетательных циркуляционных трубопроводах и датчиков давления на напорных патрубках.

Сравнение основных рабочих параметров двух доменных печей одинакового объема (V = 1513 м^3) на ПАО «Запорожсталь», оборудованными аналогичными системами охлаждения заплечиков и шахты, но различными типами холодильных плит и футеровки:

	ДП №2	ДП №4
охлаждение	«горячей» химочищенной водой с принудительной циркуляцией	
футеровка	карбидокремниевый кирпич (λ = 17–20 Вт/м*К)	шамотный кирпич (λ = 1,65 Вт/м*К)
холодильные плиты шахты	два ряда медных (λ = 380 Вт/м*К)	чугунные (λ = 38,8 Вт/м*К)
суточная производительность по выплавке чугуна	средняя — 3400 т/сут. макс. — 3700 т/сут.	средняя — 3050 т/сут.
средний расход ПУТ	152 кг/т чугуна	135 кг/т чугуна
средний расход кокса	365 кг/т чугуна	420 кг/т чугуна
средняя паропроизводительность системы охлаждения	до 1,8 т/час	до 10 т/час

Опыт эксплуатации ДП2 ПАО «Запорожсталь» подтвердил, что благодаря более низкой температуре поверхности медных холодильников (125°С) по сравнению с чугунными (более 250°С) создаются условия для формирования и поддержания гарнисажа. Значительно меньшая паропроизводительность системы охлаждения, в данном случае применим термин «тепловые потери с системой охлаждения», свидетельствует о снижении плотности тепловых потоков на медные холодильники.

При проведении ремонтов доменных печей преимущество применения современной системы охлаждения «горячей» химически очищенной водой по сравнению с охлаждением в замкнутом контуре заключается в значительно меньших капитальных затратах, меньших сроках реализации ремонта, меньшем количестве оборудования, относительной простоте эксплуатации.

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ «ХОЛОДНОЙ» ХИМВОДОЙ В ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ

К особенностям системы охлаждения «холодной» ХОВ, по сравнению с СИО с принудительной циркуляцией можно отнести потребность системы в использовании теплообменников типа вода/вода или вода/воздух, позволяющих снизить температуру подаваемой на охлаждения воды до 50÷55°С, что позволит снизить температуру холодильных плит, улучшить условие образования гарнисажа и повысить его стойкость на охлаждаемых элементах.

К недостаткам применения данной системы при проведении реконструкций доменных печей можно отнести:

- необходимость установки дополнительного оборудования, такого как теплообменники, насосы, градирни;
- необходимость подачи технической воды для охлаждения в теплообменных аппаратах химически очищенной воды первичного контура. Это оказывает дополнительную нагрузку на существую-

щий оборотный цикл водоснабжения доменного цеха. Зачастую именно эта проблема делает невозможным применение системы охлаждения в замкнутом контуре при реконструкции доменных печей.

Для снижения нагрузки на оборотный цикл водоснабжения ООО «М Технология» разработала систему автоматического регулирования расхода технической воды, подаваемой на водо-водяные теплообменники посредством установки регулятора расхода. Информация от датчиков температуры воды и расходомеров обрабатывается в контроллере управляющим регулятором давления, что позволяет в значительной мере экономить техническую воду, регулируя ее расход в зависимости от тепловой нагрузки на холодильные плиты ДП и сезонной температуры технической воды на входе в теплообменник, не допускать перегрев технической воды в теплообменнике, предотвращает выпадение солей жесткости (накипи).

При невозможности обеспечить необходимый расход технической воды, подаваемой на водо-водяные теплообменники, возможно установить водо-воздушные теплообменные аппараты, вентиляторы которых приводятся в работу электродвигателями. Недостатком применения теплообменников типа вода–воздух являются большие габаритные размеры, и, как следствие, сложность расположения в условиях реконструируемого объекта.

При проектировании ООО «М Технология» разрабатывает системы охлаждения таким образом, чтобы был обеспечен восходящий поток воды в холодильных плитах, а также при прокладке коммуникаций системы охлаждения. При аварийном отключении подачи электроэнергии такое техническое решение позволяет системе охлаждения продолжать работать без остановки печи в режиме испарительного охлаждения определенное время в зависимости от количества воды в расширительных баках до включения в работу резервных источников электропитания. Это позволяет отказаться от циркуляционных насосов с дизельным приводом.

На сегодняшний день многозонная система охлаждения «холодной» химочищенной водой в замкнутом контуре с разделением на зоны в зависимости от величины воздействия тепловых нагрузок является наиболее современной, отвечающей предъявляемым сегодня высоким требованиям надежности и безопасности эксплуатации, позволяющей продлить период кампании доменной печи до 15 лет.

Стоит отметить важность использования высококачественного оборудования, ведь от него зависит надежность и работоспособность всей системы в целом. При поставке насосного оборудования специалисты нашей компании проводят контроль качества оборудования от его производства до ввода в эксплуатацию.

Дизельный насосный агрегат для автоматической системы охлаждения ДП № 4 ПАО «ММК им. Ильича», поставка ООО «М Технология»

Электронасосный агрегат для автоматической системы охлаждения ДП № 4 ПАО «ММК им. Ильича», поставка ООО «М Технология»

Компания ООО «М Технология» готова решить любые проблемы, в области охлаждения металлургических агрегатов, начиная от проектирования и заканчивая вводом объекта в эксплуатацию и его дальнейшим сервисным обслуживанием.

М.Е. Аксюшин, М.Э. Калугин, Э.Н. Рябов, ЗАО «Калугин»

«СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ДОМЕННЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ»

Одним из основных факторов, определяющих современную экономику, является эффективность использования энергоресурсов, а именно рациональность использования природных, прежде всего топливных ресурсов, их экономное использование. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности следует рассматривать как один из основных источников будущего экономического роста.

Рекуперация тепла в системах утилизации тепла (СУТ), позволяет экономить до 30–40% потребляемой энергии. Кроме того использование подогретого воздуха вместо воздуха с температурой окружающей среды, улучшает горение топлива в печи, снижает его химический и механический недожог. В результате, при том же расходе топлива количество теплоты, получаемой в процессе горения, увеличивается на 10–15%.

Помимо экономического эффекта, получаемого от внедрения систем утилизации тепла отходящих дымовых газов, есть и экологический эффект. Это сокращение выбросов тепла с отходящими дымовыми газами в атмосферу за счет существенного снижения температуры в системах утилизации тепла.

Чем ниже температура дымовых газов после СУТ, тем выше уровень энергоэффективности. Также следует учитывать следующие факторы внедрения СУТ:

1. Срок окупаемости может находиться в диапазоне от нескольких месяцев до пяти — десяти лет, в зависимости от множества параметров, включая размер СУТ, температуру дымовых газов, экономический эффект и т.д.
2. Наличие необходимых площадей для установки оборудования.

3. Использование тепла дымовых газов может быть ограничено вследствие разницы между температурой газов и потребностями в определенной температуре на входе энергопотребляющего агрегата. Приемлемая величина указанной разницы определяется балансом между соображениями энергосбережения и затратами на реконструкцию оборудования, которое это тепло будет использовать.

Принимая решение об использовании дополнительных инвестиций, следует учитывать период проектирования и строительства новой установки СУТ.

Системы утилизации тепла дымовых газов состоят из комплекса оборудования. Это, в первую очередь, сами теплообменники, запорные и регулирующие клапаны, трубопроводы дымовых газов, воздуха или газа, система управления.

Залогом успеха внедрения СУТ является правильный выбор основного оборудования — теплообменников.

В современных промышленных технологиях образуется значительное количество отходящих дымовых газов, которые можно условно разделить на три группы: высокопотенциальные с температурой 700–900°С, среднепотенциальные — 300–700°С и низкопотенциальные — до 300°С.

Систем утилизации тепла внедрено великое множество. В них применяются в основном рекуперативные теплообменники, разные по назначению: подогреватели, конденсаторы, охладители, испарители, паропреобразователи и т.п. По относительному движению потоков теплоносителей теплообменники делятся на прямоточные, противоточные и со смешанным током. В рекуперативных теплообменниках горячий и холодный теплоносители перемещаются одновременно, а теплота непрерывно передается через разделяющую их стенку.

Компания ЗАО «Калугин» добилась определенных успехов в разработке и внедрении систем утилизации низкопотенциальных дымовых газов с температурой до 300°С и применением относительно новых для России рекуператоров на термосифонах.

Пример установки теплообменников для нагрева доменного газа и воздуха для отопления воздухонагревателей представлен на рис. 1.

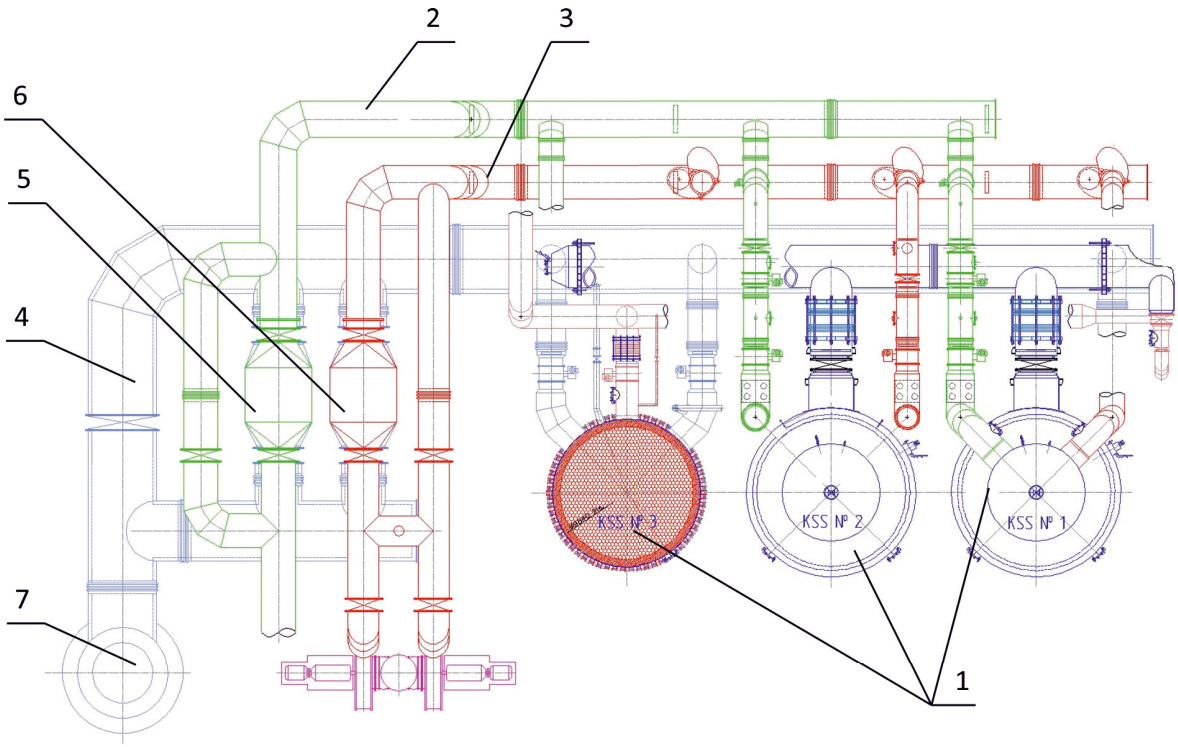


Рис. 1. План блока воздухонагревателей Калугина с устройствами для утилизации тепла отходящих дымовых газов: 1 — воздухонагреватели; 2 — газопровод; 3 — воздухопровод; 4 — боров; 5 — теплообменник газа; 6 — теплообменник воздуха; 7 — дымовая труба

Установленные теплообменники газа и воздуха обслуживают блок воздухонагревателей из трех или четырех аппаратов. Энергоэффективность подобных решений подтверждается анализом тепловых балансов работы воздухонагревателей в рабочем цикле «нагрев насадки – нагрев доменного дутья». Расчеты балансов выполнены для условий работы доменной печи объемом 2700 м^3, выплавляющей обычный чугун. Производительность доменной печи обеспечивается подачей высоко нагретого дутья, расход которого для всех рассмотренных режимов составляет 5400 м^3/мин. Нагрев доменного дутья осуществляется в блоке воздухонагревателей состоящего из 4-х аппаратов, работающих в последовательном режиме. Каждый воздухонагреватель находится в течении 3 часов в режиме нагрева насадки и 1 час в режиме нагрева доменного дутья. В табл. 1 (Режим 1) приведены результаты расчета теплового баланса ВНК, который обогревают, сжигая холодный доменный газ, используя для этого холодный воздух. Для того, чтобы температура нагрева доменного дутья составляла 1250°С, обеспечивается обогащение доменного газа природным газом в количестве 3,66% (по объему). Результаты расчета теплового баланса для случая нагрева дутья до 1250°С при подогреве доменного газа и воздуха для отопления ВНК до 150°С за счет теплоты продуктов горения, имеющих температуру 250°С, представлены в табл. 1, Режим 2. В этом случае обогащение доменного газа природным газом уменьшено до 0,86% (по объему), т.е. на 75,5%. Расчет теплового баланса для Режима 3 (табл. 1) произведен для нагрева дутья до 1310°С с учетом подогрева необогащенного доменного газа и воздуха для отопления ВНК до 200°С в пластинчатом теплообменнике продуктами горения с температурой 300°С.

Таблица 1. Энергоэффективность режимов работы доменных воздухонагревателей

Режимы тепловой работы	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Расход доменного дутья, м^3/мин	5400	5400	5400
Температура доменного дутья, °С	1250	1250	1310
Температура купола, °С	1420	1420	1430
Температура продуктов горения (средняя), °С	250	250	300
Температура нагрева доменного газа и воздуха, °С	0	150	200
Расход доменного газа м^3/час	148426	175778	202095
Расход природного газа,%	5639	1525	0
Коэффициент полезного действия, %	78,0	83,7	83,8
Расход условного топлива на нагрев 1000 м^3 дутья, кг у.т./1000 м^3 дутья	74,57	69,19	73,07
Величина экономии топлива по отношению к Режиму 1 нагрева дутья: кг у.т./1000 м^3 дутья (числитель), %% (знаменатель).	0 / 0	5,38 / 7,215	1,50 / 2,012

Анализ полученных данных, представленных в Табл. 1, позволяет выделить следующие основные преимущества нагрева доменного газа и воздуха, поступающих в доменный воздухонагреватель для сжигания и последующего нагрева регенеративной насадки:

1. При нагреве доменного дутья до одинаковых температур и подогреве газообразного топлива и воздуха до 150°С (Режим 2) существенно снижается потребление природного газа. Это снижение составляет 73 %;
2. Общий расход топлива на нагрев доменного дутья (Режим 2), выраженный через удельный расход условного топлива при нагреве 1000 м^3 доменного дутья, уменьшается с 74,57 до 69,19 кг у.т./1000 м^3 дутья, т.е. на 7,215%. Годовой фонд рабочего времени доменной печи обычно составляет 361 сутки. В этих условиях годовая экономия топлива в сравнении с работой доменной печи по Режиму 1 достигает значительной величины, а именно — 15 102 т условного топлива.
3. Нагрев доменного дутья до 1310°С (Режим 3) можно обеспечить при отоплении воздухонагревателя только доменным газом (без добавок природного газа), если этот газ и необходимое для его го-

рения соответствующее количество воздуха при коэффициенте избытка воздуха, равным единице, нагревать до 200°С;

4. При нагреве дутья до 1310°С также достигается экономия топлива, величина которой несколько превышает 2,0%. В условном топливе годовая экономия составляет 4210,7 тонны.
5. Экономия топлива на нагрев доменного дутья позволяет значительно уменьшить выбросы тепла в атмосферу, и, соответственно, уменьшить выбросы CO_2, NO_x и др.

Следует подчеркнуть, что приводимые данные по экономии топлива в результате лучшей организации теплового режима воздухонагревателей связаны только со снижением удельного расхода доменного газа и сокращением добавок природного газа на нагрев дутья. Такие результаты достигаются за счет утилизации тепловой энергии продуктов горения для нагрева доменного газа и воздуха, в результате чего процесс нагрева насадки обеспечивается дополнительной теплотой. При этом создаются условия возможности работы воздухонагревателей без использования природного газа.

1. РЕКУПЕРАТОРЫ НА ТЕРМОСИФОНАХ

Прежде чем рассматривать термосифонные теплообменники, кратко охарактеризуем сам двухфазный термосифон, принцип действия которого показан на рис. 2, внешний вид установки термосифона показан на рис. 3, поз. 3.

Двухфазный термосифон состоит из четырех основных частей: корпуса, двух торцевых крышек и теплоносителя [1,2]. Корпус изготовляется из трубы. Для увеличения площади и улучшения теплообмена на поверхность трубы посредством высокочастотной спиральношовной сварной технологии нанесено винтообразное оребрение.

Нижняя торцевая крышка — глухая, верхняя — с дополнительной трубкой через которую производится заправка трубы теплоносителем и вакуумирование. Толщина стенки корпуса и толщина крышек выбираются согласно расчету на прочность термосифона. Размеры трубы термосифона, площадь оребрения, количество термосифонов в теплообменнике, а также соотношение длин термосифона «испаритель-конденсатор», выбираются по результатам общего расчета теплообменника.

Заправка теплоносителем, вакуумирование полости термосифона и его герметизация это единый совмещенный процесс. После заполнения термосифона определенным количеством теплоносителя через верхнюю торцевую крышку из полости термосифона откачивается воздух и крышка запаивается.

Лучшим теплоносителем по многим параметрам является специально обработанная вода. Из всех известных теплоносителей, за исключением жидких металлов, вода обеспечивает наибольший теплоперенос, обладает высокой теплопроводностью, которая в несколько раз больше чем у медного стержня тех же размеров. Кроме того, вода как теплоноситель дешева, общедоступна, пожаро- и взрывобезопасна. Единственное ограничение по применению термосифонов, заправленных водой — это температура дымовых газов, которая должна быть не более 280–300°С.

Внутри термосифона протекают три процесса — кипение (испарение), конденсация и конвективный тепломассоперенос между участками кипения и конденсации. Термосифон можно разделить на три зоны: зона нагрева (испарения), транспортная зона и зона конденсации. Деление на эти зоны весьма условно, так как перенос жидкости и пара происходит во всех зонах.

Термосифон работает следующим образом: при подводе теплоты к испарителю, теплоноситель начинает кипеть, и образующийся пар за счет разности давлений в испарителе и конденсаторе, создающегося в результате уменьшения объема при конденсации пара, движется в конденсатор, где конденсиру-

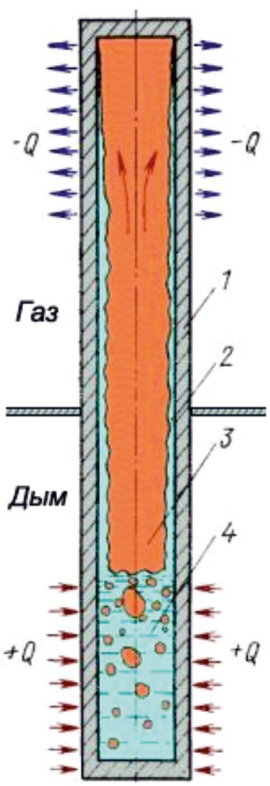


Рис. 2 – Термосифон. Принцип работы. 1 – труба металлическая; 2 – конденсат; 3 – пар; 4 – жидкость

ется на стенках, отдавая теплоту фазового перехода охлаждающей среде. Конденсат под действием гравитационных сил движется в испаритель. Процессы в термосифоне протекают непрерывно, что обеспечивает передачу теплоты постоянно от одной зоны к другой. В транспортной зоне обычно создаются адиабатные условия, т.е. теплота не подводится и не отводится через стенки. Термосифоны, использующие для перемещения жидкой фазы теплоносителя силу гравитации, могут передавать теплоту только в одном направлении — от испарителя к конденсатору.

Традиционный теплообменник на термосифонах (рис. 3) состоит из двух основных частей: кожуха (2) и множества термосифонов (3). Кожух теплообменника представляет собой герметичную конструкцию, разделённую пополам перегородкой (1). Нижнее отделение является трактом дыма (зона испарения), верхнее — трактом воздуха или газа (зона конденсации). В теплообменнике нет прямого контакта между греющей и нагреваемой средами. Передача тепла осуществляется посредством термосифонов, которые закреплены в разделительной перегородке специальными гайками. Концы труб термосифонов свободны. Тем самым решен вопрос теплового расширения труб термосифонов. Верх теплообменника выполнен в виде общей съемной крышки. Корпус теплообменника снаружи изолирован.

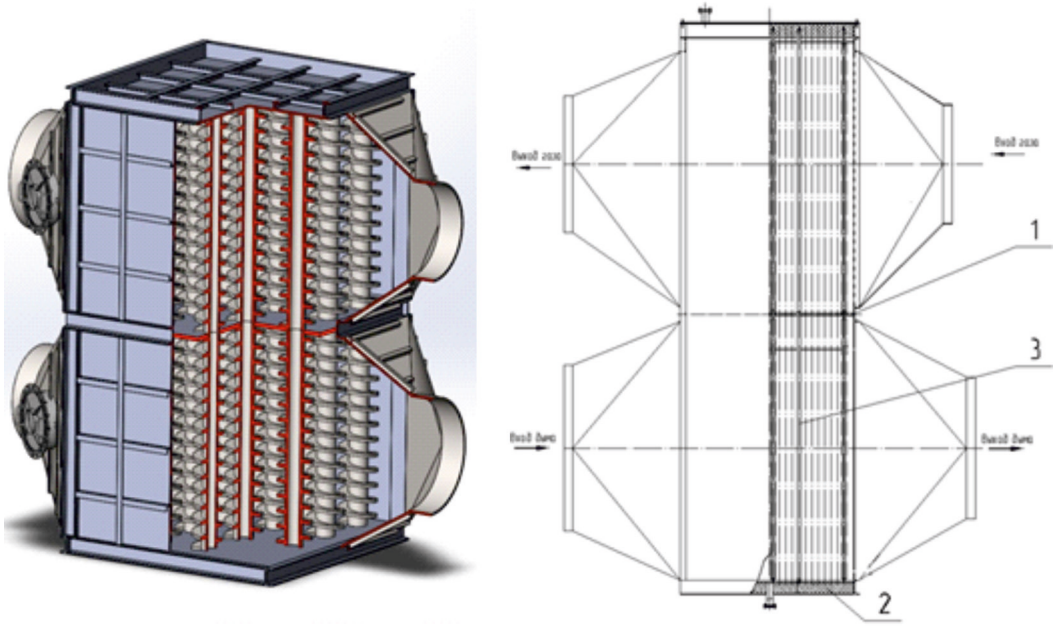


Рис. 3. Теплообменник на термосифонах: 1 — разделительная перегородка, 2 — кожух, 3 — термосифон

Разгерметизация термосифона, например, при прогаре трубы, одновременно в двух точках расположенных в зоне испарения и в зоне конденсации маловероятна, поэтому проникновение рабочих сред из одной зоны в другую исключено. В разделительную перегородку вставляется до нескольких сотен термосифонов.

Выход из строя даже нескольких термосифонов не сказывается на работоспособности теплообменника и не требует немедленной остановки основного технологического агрегата. Ремонт можно осуществлять при плановых остановках технологического оборудования. Сняв верхнюю крышку теплообменника, заменяют вышедшие из строя термосифоны. Это существенное преимущество таких теплообменников по сравнению с трубчатыми, в которых прогар даже одной трубы зачастую приводит к выходу из строя всего теплообменника и требует его немедленного ремонта или замены.

Эксплуатация системы утилизации дымовых газов с использованием теплообменников на термосифонах не требует дополнительного обслуживающего персонала и дополнительных затрат.

Опыт работы систем утилизации тепла отходящих дымовых газов с рекуператорами на термосифонах доказал, что их применение имеет ряд преимуществ перед трубчатыми и пластинчатыми рекуператорами:

- теплообменники на термосифонах имеют за счет винтообразного оребрения большие поверхности теплообмена, значительно меньше по размерам, чем трубчатые рекуператоры, менее металлоемкие, а значит более дешевые, и занимают меньшие производственные площади;
- повреждение даже нескольких термосифонов не ведет к выходу из строя всего теплообменника. Вышедшие из строя термосифоны могут быть заменены при любой плановой остановке технологического агрегата.

2. РЕКУПЕРАТОРЫ ПЛАСТИНЧАТЫЕ

В последнее время, с развитием высокочастотной и лазерной технологий сварки, начинают получать широкое распространение, особенно для СУТ с высокими температурами дымовых газов (600–1000°С), пластинчатые рекуператоры с оребренными пластинами.

Пластинчатые рекуператоры имеют давнюю историю. Еще в 30-е годы прошлого века широкое распространение получили пластинчатые рекуператоры, в которых использовались блоки из набора тонкостенных плоских листов. Необходимая поверхность теплообмена обеспечивается за счет большого количества этих листов, при этом либо устройство должно было иметь большой объем, либо зазоры между пластинами должны быть весьма малыми.

Стремление увеличить поверхность теплоотдачи за счет малых зазоров с большим количеством пластин привело к значительном росту аэродинамического сопротивления рекуператоров. Наличие значительных аэродинамических сопротивлений исключает возможность теплообмена больших объемов газов (если только не допускается весьма значительные габариты устройств, что возможно далеко не всегда). Продавливание через устройства с большими сопротивлениями значительных объемов газов с помощью мощных вентиляторов приводит к «схлопыванию» пластин и разрушению рекуператоров.

Замена плоских пластин на гофрированные различных конфигураций не приводит к существенному увеличению поверхностей, но еще более увеличивает аэродинамическое сопротивление устройств. При эксплуатации гофрированных рекуператоров с высокими температурами дымовых газов выявилась еще одна существенная проблема: растрескивание пластин в течении короткого срока эксплуатации и, как следствие, выход рекуператоров из строя. Особенно быстро (от 4 месяца до одного года) это явление наблюдается при больших колебаниях температуры дымовых газов в ограниченно малый промежуток времени.

Проведенное обследование вышедших из строя рекуператоров показало следующее: растрескивание происходит по причине «механической» коррозии, т. е. из-за наличия напряжений в металле, что приводит к быстрой «усталости» металла. Этот вывод был сделан на основании исследования сечения металла в местах трещин пластин [3]. «Механическая» коррозия пластинчатых теплообменников связна в первую очередь с технологией изготовления пластин, а именно: при штамповке пластин из листа в структуре металла нарушаются межкристаллитные связи, а в процессе эксплуатации пластинчатых рекуператоров происходят микровибрации пластин, что и приводит в конечном итоге к их растрескиванию в период непродолжительной эксплуатации.

Развитие новых технологий сварки дали новый толчок в развитии пластинчатых рекуператоров. В результате модернизации сварочного оборудования и технологии лазерной сварки [4] была получена возможность производства оребренных панелей из тонколистового (1.0–1.5 мм) проката с приваркой ребер в тавр к основному листу (рис. 4).

Оребренная панель представляет собой активную теплообменную поверхность. Для получения оптимальных характеристик рекуператора возможно изменение параметров панелей (высота и количество ребер, размер ячеек) в широких пределах. Панель площадью 1 м^2 с учетом поверхности приваренных ребер может иметь поверхность теплоотдачи равную 2–10 м^2 в разы превышающую поверхность теплоотдачи трубчатых рекуператоров.

Известными промышленными методами получить оребренные панели такой конструкции практически невозможно. Этим и объясняется отсутствие до настоящего времени надежных пластинчатых рекуператоров особенно в области высокотемпературного теплообмена.

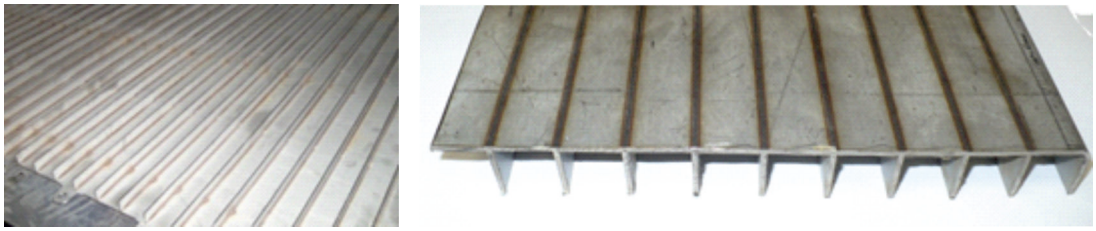


Рис. 4. Оребренная листовая панель, выполненная методом лазерной сварки

Благодаря особенностям лазерной сварки шов не отличается от основного металла, равнопрочен, пластичен, допускает изгибы и местную деформацию, не склонен к коррозии (в т.ч. межкристаллитной).

Разработанный компанией ЗАО «Калугин» процесс позволяет изготавливать панели из коррозионно-стойких (в т.ч. из жаропрочных) сталей и сплавов с рабочей температурой до 1100–1250°С. Возможно также изготовление биметаллических сварных соединений (например: лист из одной, а ребра из другой стали или сплава) и производство рекуператоров, выполненных со стороны высокой температуры из жаропрочного металла, а с низкотемпературной стороны из обычной нержавеющей или малоуглеродистой стали. Эти возможности могут быть весьма полезными, учитывая высокие цены на нержавеющие и, особенно, на жаропрочные стали.

При объединении оребренных пластин создаются новые блоки нагрева рекуператоров. Их конструкция достаточно проста (рис. 5). Блок представляет собой «слоеный пирог», выполненный в виде чередующихся полостей нагревающей и нагреваемой сред. Для обеспечения требуемой мощности рекуператора набирается блок из необходимого количества оребренных пластин и выбирается компоновка рекуператора (рис. 6). На входе и выходе газовых трактов устанавливаются диффузоры и конфузоры.

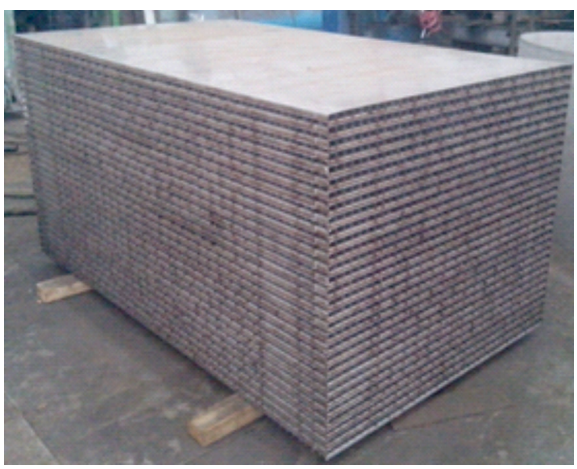


Рис. 5. Блок нагрева рекуператора

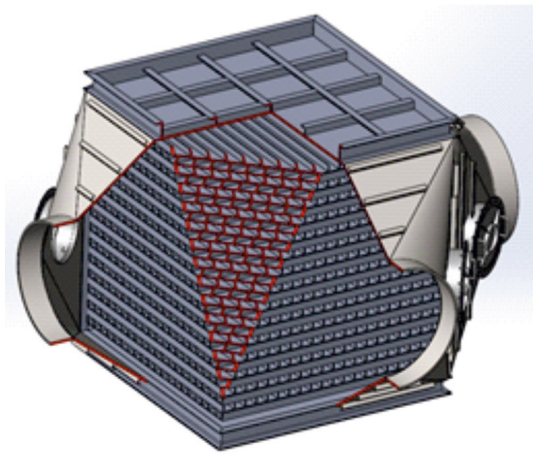


Рис. 6. Рекуператор пластинчатый

Между блоками нагрева, на входе или выходе греющего и нагреваемого трактов устанавливаются компенсаторы температурного расширения.

Различные сочетания положений панелей и блоков нагрева друг относительно друга позволяют создавать одноходовые и многоходовые рекуператоры.

Блочное исполнение дает возможность упростить процессы монтажа, обслуживания и ремонта рекуператора. Открытый доступ к каналам газовых трактов позволяет осуществлять осмотр и прочистку каналов, а относительно малые аэродинамические сопротивления допускают высокие скорости газовых потоков (более 14 м/с), что позволяет избегать отложение пыли (зашлаковывания) в каналах, ухудшающих параметры рекуператора.

Исследования показали, что новые рекуператоры благодаря малой толщине элементов обладают дополнительными достоинствами: низкой инерционностью, высокой термопластичностью, что осо-

бенно важно при работе на нестабильных по температуре дымовых газах, например, дымовых газах от шахтных печей и вагранок с большим разбросом по рабочей температуре (200–1000°С) в течение небольшого периода времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергоэффективность тепловой работы доменных воздухонагревателей существенно улучшается за счет утилизации тепловой энергии продуктов горения. от Использование для этих целей пластинчатых теплообменников и теплообменников на термосифонах позволило создать компактные системы утилизации тепла, которые в настоящее время обеспечивают нагрев доменного газа и воздуха до 150°С (термосифоны) с перспективой нагрева этих газовых сред до 200–250°С (пластинчатые) без установки дополнительных топок.

Список литературы

1. Пиоро Л.С., Пиоро И.Л. Двухфазные термосифоны и их применение в промышленности. — Киев : Наукова Думка, 1988. — 132 с.
2. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы: Пер. с англ. — М.: Энергия, 1979. — 272 с.
3. Бурлов В.В. д. т. н., зам гендиректора по научной работе и инжинирингу ОАО «ВНИИНефтехим» Доклад «Конструктивные особенности пластинчатых теплообменников, влияющие на их работоспособность в условиях переработки нефти».14–17.02 2013 г. Совет главных механиков нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий России и стран СНГ.(http://www.lotus1.ru/company_news/0/211?p=13).
4. RU 2567 971 C1 Описание изобретения к патенту. Мурзин Ю.А., Аксюшин М.Е., Богданов К.О. Листовая панель с рёбрами и способ её изготовления

Петер Клут, Вутер Эвальтс, Робин Хинк, Эдо Энгель, «Danieli Corus»

ПОСЛЕДНИЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИИ СУХОЙ И МОКРОЙ ОЧИСТКИ ДОМЕННОГО ГАЗА

АННОТАЦИЯ

Большинство из последних разработок в области технологии очистки доменного газа основаны на системах сухой очистки газа. Danieli Corus разработала новую систему, применив испытанную технологию группы Danieli для сухой очистки газов, производимых ДСП, конвертерах, при прямом восстановлении, и при выплавке алюминия. Данная новая система состоит из башни для подготовки газа, системы закачки реагентов и фильтровых модулей (под давлением) с пульсирующей очисткой под низким давлением. Система была спроектирована из расчета остаточного содержания пыли менее 5 мг/нм^3 и для увеличения производительности ГУБТ и калорийности доменного газа. Для систем мокрой очистки газа Danieli Corus представила новый тип каплеуловителя, который заменит существующие модели. Этот тип каплеуловителя является более компактным и занимает меньшую площадь, и в то же время обладает большей мощностью. Новый каплеуловитель требует меньше инвестиций, и в то же время обеспечивает более высокую калорийность доменного газа.

1. ВВЕДЕНИЕ

Прежде, чем доменный газ может быть использован в процессе горения, он должен быть подготовлен и очищен. Обычные системы газоочистки состоят из гравиметрического пылеуловителя в комбинации с мокрой второй стадией с использованием скруббера

Бишофа и каплеуловителя. Замена гравиметрического пылеуловителя циклонами увеличивает эффективность удаления пыли на первой стадии с 50% примерно до 85%. Поскольку обе фракции имеют низкое содержание элементов, являющихся критичными для доменных процессов, таких как цинк, то эти объемы могут быть подвергнуты повторной переработке на агломерационной фабрике без дальнейшей переработки, демонстрируя явное преимущество циклона над гравиметрическими пылеуловителями. Внедрение технологии с использованием циклонов на первой стадии удаления пыли в настоящее время широко применяется в нашей промышленности.

В последние годы были представлены несколько технологий по сухому отделению пыли на второй стадии очистки доменных газов. При применении сухой очистки газа объем тепловой энергии используемой для воды/шлама значительно снижается, что является преимуществом при выработке электроэнергии. При использовании технологий мокрой очистки газа, существующих и новых, эффективность удаления капель является ключевой, так как нагрузка на ГУБТ и газовые турбины является ключевым параметром для их работы и состояния. Кроме того, влажность в системе горячего дутья, возникающая в связи с недостаточным удалением влаги, может привести к существенным поломкам из-за коррозии поднадсадочного устройства.

2. СУХАЯ ОЧИСТКИ ГАЗА

2.1. Процесс

Технология сухой очистки газа Danieli Corus имеет ряд преимуществ по сравнению с существующими и конкурирующими технологиями. Процесс сухой очистки газа состоит из 4 ступеней (3 новых и существующий циклон для удаления пыли), которые будут описаны более подробно в следующих главах: подготовка газа, добавление абсорбента и удаление пыли.

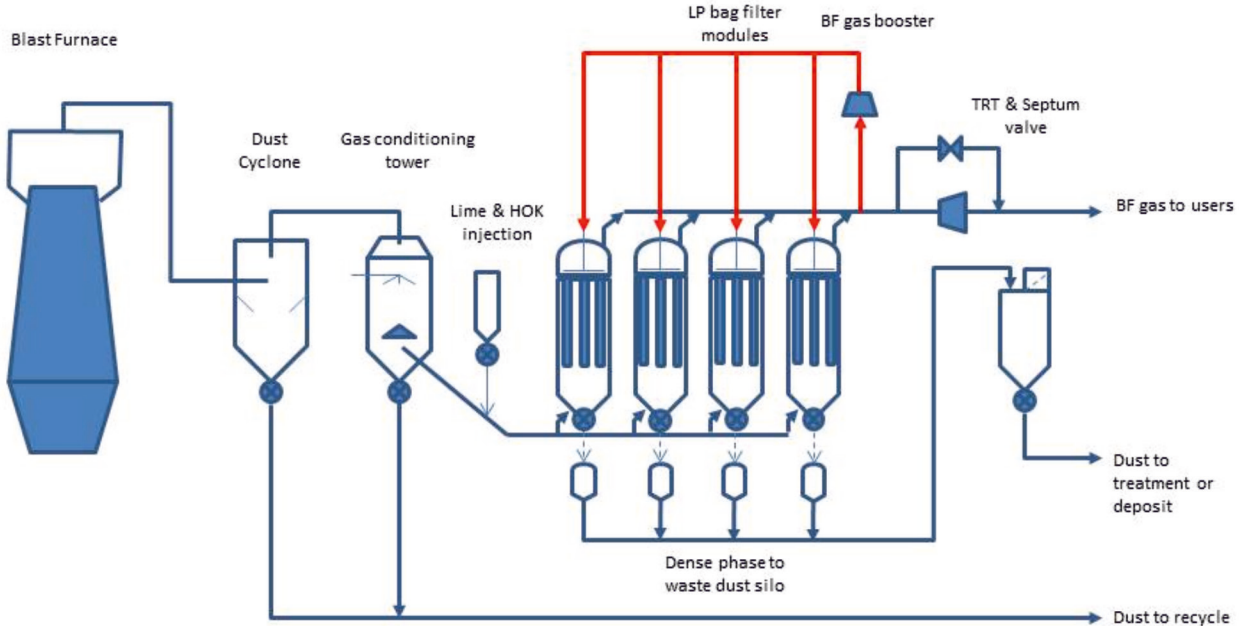


Рис. 1. Схема процесса

2.2. Подготовка доменного газа

Подготовка доменного газа необходима в том случае, если температура газа превышает 250°C. В большинстве случаев такая высокая температура является следствием внезапного схода шихты в доменной печи. При этом вступает в работу. Башня-градирня для подготовки газа предус-

матривается таким образом, что доменный газ подается в верхнюю часть башни, а вода распыляется параллельными струями. Вода нагнетается вместе с азотом для производства водяной пыли с каплями диаметром ~150 нм. Время нахождения в башне-градирне должно быть достаточным, чтобы все капли полностью испарились на выходе из градирни. Температура газа на выходе из градирни всегда должна быть 200°С или меньше.

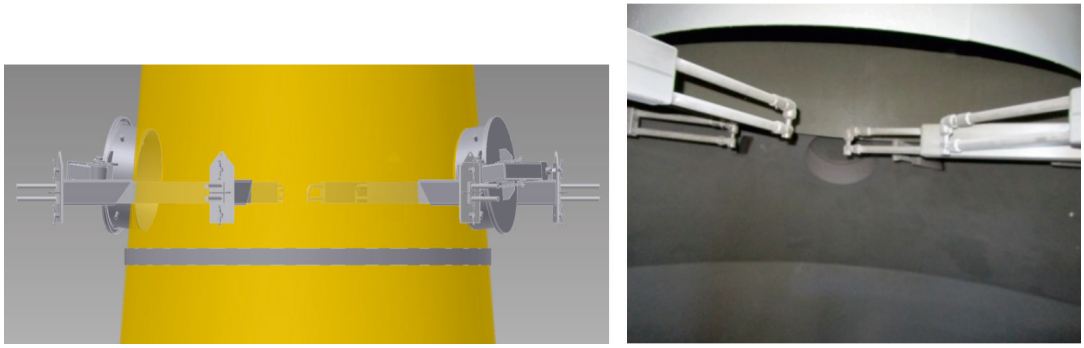


Рис. 2. Подача воды в башню-градирню

Угол конического верха градирни (6°) создает безвихревой газовый поток на поверхности, что не позволяет каплям касаться стен. При этом стены остаются сухими и отложения пыли минимальны. Такая технология подготовки газа является хорошо себя зарекомендовала в проекте Danieli Corus для в системы подготовки газа в алюминиевой промышленности. Распылительные форсунки, использующиеся для распыления воды, сконструированы таким образом, чтобы занимать всю окружность на входе. Сопла форсунок изготовлены из износостойкого сплава Хастеллой для обеспечения тяжелых условий в трубопроводе доменного газа. Диапазон регулирования количества воды на форсунках составляет 1 : 6 при сохранении диаметра капель. Более того, форсунки могут работать по отдельности, что позволяет добиться еще большего диапазона регулирования. Фурмы можно легко демонтировать снаружи башни градирни. Для этого предусмотрены площадки и инспекционный люк.

2.3. Добавление абсорбента

В зависимости от сырья и использования пылеугольного топлива в доменной печи, может понадобиться добавка абсорбента в доменный газ, чтобы удалить газообразные загрязняющие вещества в газе. Добавление абсорбента производится после градирни и до этапа удаления пыли. Для удаления кислых компонентов, таких как соляная кислота, предусмотрено добавление щелочи. Удаление углеводородных компонентов производится путем добавления активированного угля /лигнита. Распределение абсорбента в газовом потоке является чрезвычайно важным. Чем лучше происходит распределение, тем лучше контакт с газом. Наибольшая эффективность отделения достигается, когда частицы абсорбента образовывают суспензию в потоке газа. Таким образом вся поверхность частицы доступна для реакции с загрязняющим веществом. После того, как частица улавливается рукавным фильтром, частица адсорбента все еще может производить очистку проходящего через нее газа, но в этом случае для реакции будет доступен только небольшой процент площади частицы. Поэтому применение нагнетательной установки является более эффективным. Частицы абсорбента

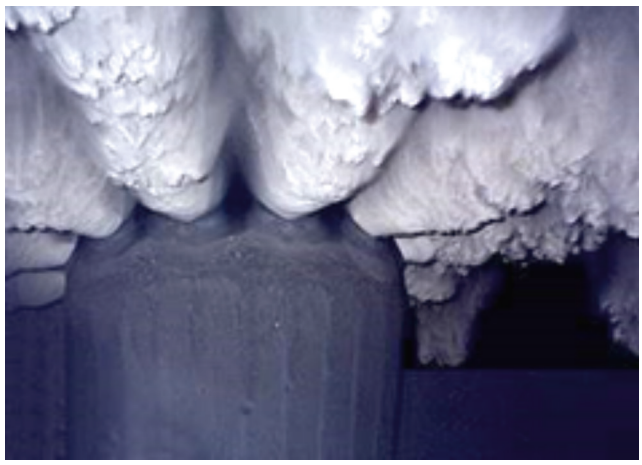


Рис. 3. Нагнетатель абсорбента

поступают в газовый поток радиально, и покрывают всю окружность газопровода. Это так называемый ВРН (Вертикальный Радиальный Нагнетатель) и он является стандартной единицей оборудования газоочистительных установок, строящихся компанией Danieli Corus для алюминиевой промышленности. Часть абсорбента (и пыль) повторно подается на ВРН для обеспечения более рациональной стехиометрии. При этом процесс требует меньше абсорбента и создает меньше отходов по сравнению с другими способами.

2.4. Фильтрующие модули для удаления пыли

Подготовленный доменный газ и нагнетаемый абсорбент подаются на несколько фильтрующих модулей, в которых рукавные фильтры производят разделение пыли и чистого газа. Рукавные фильтры располагаются по кругу, чтобы вместить как можно больше фильтров в круглых емкостях давления. Это позволяет увеличить площадь фильтровальной ткани на каждый модуль. Благодаря использованию пульсирующей очистной системы низкого давления, рукавные фильтры могут иметь большую длину, чем стандартные фильтры системы высокого давления. Такие рукавные фильтры с увеличенной длиной позволяют также увеличить площадь фильтрации в каждом модуле. Таким образом, проект Danieli Corus требует намного меньше фильтрующих модулей, чем конкурирующие системы. Каждый модуль оборудован секторной задвижкой на входе и выходе для обеспечения техобслуживание модуля без остановки производства. Проект N-1 позволяет вывести один модуль из производства для техобслуживания / замены мешков не оказывая влияния на качество газа или работу доменной печи.

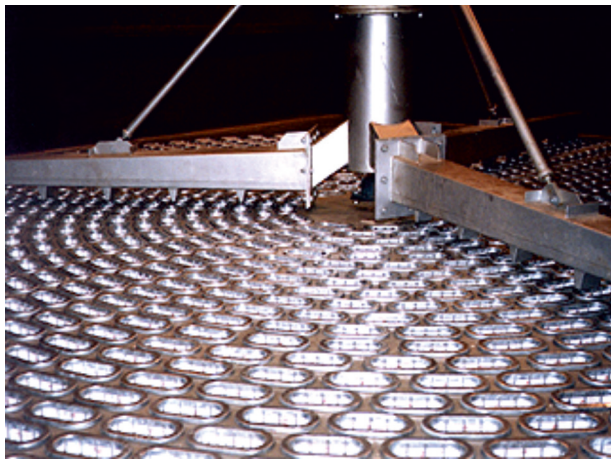


Рис. 4. Фильтрующие модули

Каждый модуль оборудован азотной продувкой, так что модули могут быть безопасно открыты и провентилированы перед доступом.

2.5. Пульсирующая очистная система низкого давления

Рукавные фильтры в фильтрующих модулях необходимо часто чистить для удаления слоев пыли, которая в них со временем отлагается. В пульсирующей очистной системе низкого давления большие объемы газа поступают в рукавные фильтры для сдувания пыли. При этом пыль на внешней стороне мешка выбрасывается с мешков. Газ, использующийся для регенерации фильтра — это чистый доменный газ под давлением примерно 0.8 бар. Использование доменного газа не влечет за собой разбавление доменного газа, и, таким образом, не ухудшает качество газа в отличие от конкурирующих технологий. Распределение пульсирующего доменного газа осуществляется медленно вращающимся устройством с тремя консолями, на которых расположены газонагнетательные форсунки. Использование вращающихся консолей обеспечивает легкий доступ к фильтрующим рукавам. В случае, если порванный рукав находится под консолью, ее можно легко переместить. Снятие консоли с трубой и форсунками не требуется.

2.6. Сухая газоочистка: преимущества

Сухая газоочистка обладает такими преимуществами как снижение количества выбросов CO_2 благодаря более высокой температуре, улучшение качества доменного газа, а также отсутствие использования воды и химикатов для воды. Установка очистки доменных газов мощностью 600.000 Нм^3/ч имеет следующие характеристики экономии энергии:

Параметр	Количество
Доменный газ более высокой температуры	4000 кВт
Разбавление газа из-за влажности	80 кВт
Теплота испарения капель	400 кВт
Экономия энергии на воздуходувной машине холодного дутья	120 кВт
Дополнительный выход энергии на ГУБТ	4000 кВт
Экономия воды	~ 225 м³/ч
Экономия на химикатах для воды (2 ч/млн. @ 1200 м³/ч @ € 10 /кг)	—
Дополнительный абсорбент	100 кг/ч
Итого	

Ожидаемый срок возврата на сделанные инвестиции для установки сухой газоочистки составляет примерно 1,5 года.

В дополнение к этому преимуществу система обладает таким достоинством, как значительно меньшая занимаемая площадь, поскольку нет необходимости в установке очистки стоков. Площадь, необходимая для установки сухой очистки газа (башня-градирня, модули рукавных фильтров, бункеры для хранения пыли) составляет около 500 м², при этом общая площадь системы мокрой очистки газа (2 отстойника, градирни, установка обезвоживание шлама, мокрая очистка, каплеуловитель, здания насосных) составляет примерно 10,000 м².

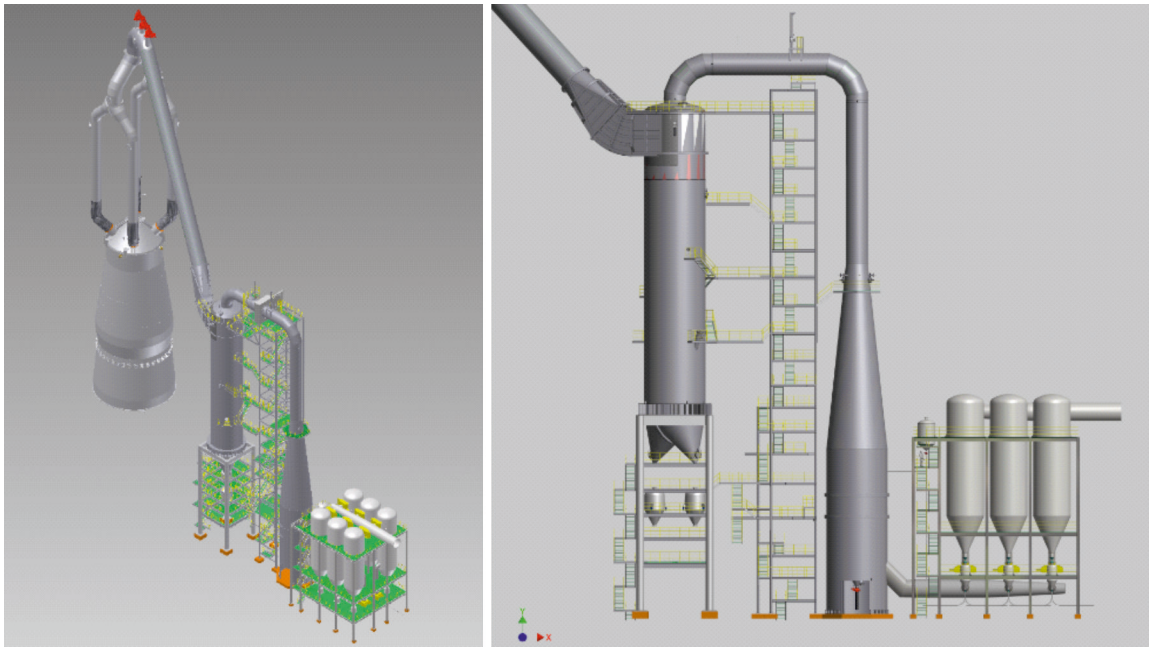


Рис. 5. План небольшого участка для сухой очистки газа

3. НОВЫЙ КАПЛЕУЛОВИТЕЛЬ

В системах мокрой очистки газа каплеуловитель необходим после скруббера с кольцевым зазором или очистной установки Вентури для предотвращения уноса капель. Каплеуловитель, который в настоящее врем используется в большинстве доменных печей, это осевой каплеуловитель ци-

клонного типа. В этом проекте газу и каплям придается крутящее движение при помощи ряда направляющих лопаток, что приводит к отделению капель от доменного газа. В связи с большим перепадом давления элементов кольцевого зазора возникает большое количество мелких капель. По оценкам, содержание свободной влаги может достигать 250 г/Нм^3. В этом отношении существующий каплеуловитель достаточно эффективен, учитывая, что содержание капельной влаги на выходе находится в диапазоне 4–5 г/Нм^3; эффективность составляет 99.6%. В энергетической, нефтяной и газовой промышленности содержание капельной влаги 5 г/Нм^3 считается слишком высоким, и для этих отраслей промышленности были разработаны более эффективные каплеуловители. Такой более эффективный каплеуловитель может обеспечить содержание капельной влаги с концентрацией < 0.1 г/Нм^3. Danieli Corus объединила усилия с Sulzer, крупным изготовителем оборудования для сепарационных систем для нефтяной и газовой промышленности, чтобы разработать каплеуловитель, который может использоваться для удаления капель из доменного газа после скруббера с кольцевым зазором.

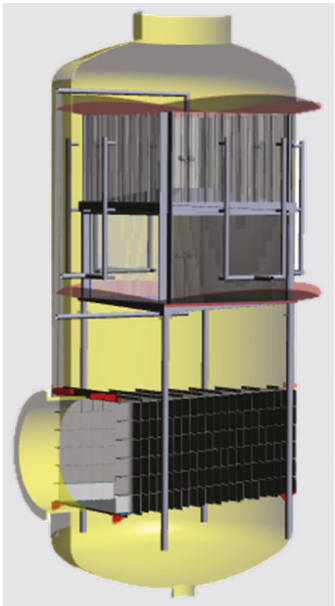


Рис. 6. Новый каплеуловитель, разработанный Danieli Corus и Sulzer

В результате данного сотрудничества была разработана запатентованная конструкция каплеуловителя, которая позволяет достичь концентрацию свободной влаги в чистом доменном газе <0.1 г/Нм^3, что означает эффективность удаления влаги 99.96%. Конструкция обладает следующими особенностями:

- Небольшая занимаемая площадь
- Схожий перепад давления
- Схожие капитальные затраты
- Эффективность > 99.9%
- Ожидаемый срок возврата на инвестиции < 1 года.

Остаточные капли в очищенном доменном газе переносятся к воздухонагревателю, ГУБТ и горелкам на котлах. Интенсивный контакт пыли с водой в кольцевом зазоре очистной установки приводит к тому, что капли содержат пыль. В воздухонагревателе капли частично могут собираться внизу горелки, что ведет к коррозии и утечкам. В воздухонагревателях капли испаряются, что ведет к потере температуры / снижает температуру купола. Пыль в каплях может вызвать проблему выброса пыли во время цикла нагрева или привести к отложениям пыли в насадке. На ГУБТ капли, содержащие пыль могут формировать отложения на лопатках турбины, что приведет к дисбалансу и эрозии лопаток и может привести к выходу из строя ГУБТ или потребовать более частое техническое обслуживание. Капли, которые дренируются через водяные затворы из магистралей системы распределения доменного газа должны собираться и очищаться в связи с химическим составом воды. Таким образом, удаление капель из доменного газа необходимо для надлежащей работы воздухонагревателя, ГУБТ и котлов.

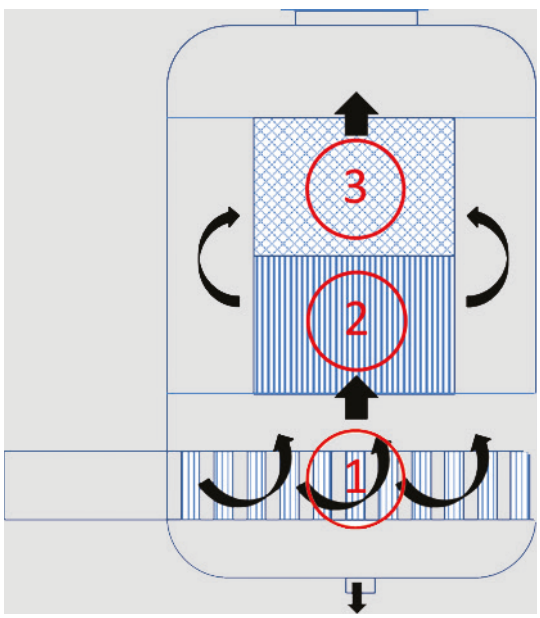


Рис. 7. Трехэтапный процесс

Недавно разработанный каплеуловитель имеет три этапа удаления капель из доменной печи. Конструкция основана на трехэтапном процессе:

1. Кожух SchoepentoeterTM на входе
2. Каплеуловитель Sulzer MellachevronTM
3. Sulzer KnitmeshTM & MellachevronTM.

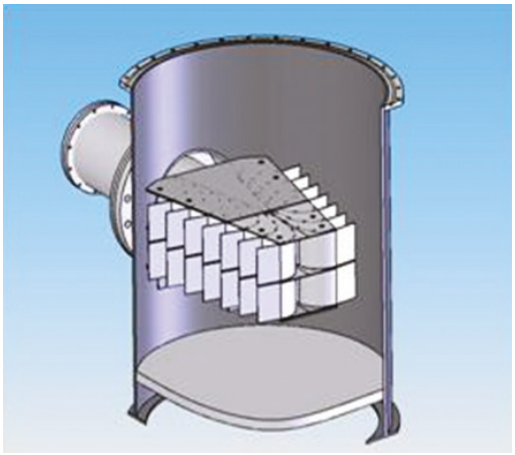


Рис. 8. Конструкция входа на основе кожуха Schoepentoeter™

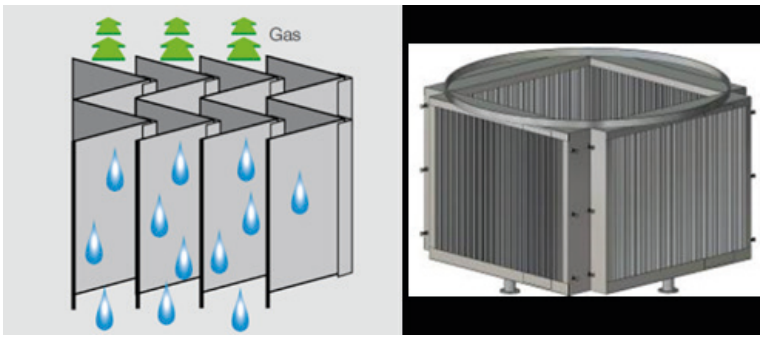


Рис. 9. Sulzer Mellachevron™

Первый этап конструкции это рассекатель в кожухе Schoepentoeter™, через который подается и распределяется доменный газ в колонну с одновременным отделением крупных капель.

На всех этапах процесса капли собираются внизу емкости и возвращаются в скруббер. Второй этап состоит из каплеуловителя лопастного типа Chevron, Sulzer Mellachevron™, который состоит из вертикально размещенных лопастей, которые отделяют капли используя инерцию капель.

Самые мелки капли, которые проходят через каплеуловитель chevron, необходимо укрупнить прежде, чем они могут быть отделены, третий этап процесса. Укрупнение производится при помощи Sulzer Knitmesh™ работающем в заливном режиме, создавая горизонтальный поток капель. Такие укрупненные капли собираются в Mellachevron™, расположенном после Knitmesh™.

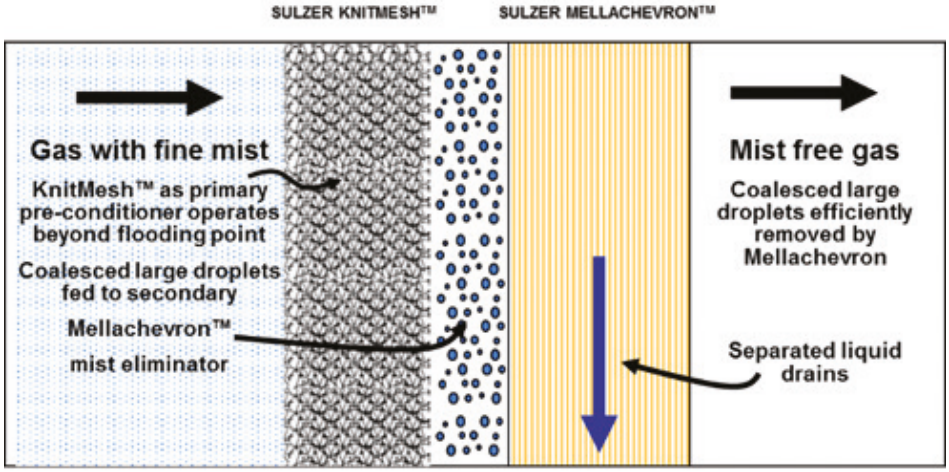


Рис. 10. Sulzer Knitmesh™

Вся жидкость, собираемая на первом и втором каплеуловителе chevron по трубам в нижнюю часть емкости и затем выводится на скруббер.

Для большой доменной печи с производительностью газа 600,000 Нм³/ч финансовая выгода существенна. Тепло, связанное только с испарением, составляет 17,395 МВтч за счет тепловых потерь. Согласно оценке, стоимость разработанного каплеуловителя немного выше, чем у существующей осевой конструкции, а окупаемость инвестиций нового каплеуловителя составляет менее года.

Сбор капель обычный каплеуловитель	г/Нм³	5,000
Сбор капель новый каплеуловитель	мг/Нм³	100
Расход доменного газа	Нм³/ч	600,000
Теплота испарения	кДж/кг	2,500
Чистый прирост тепловой энергии	кДж/с = кВт	2,042
Время работы доменной печи	Дней в год	355
Годовая экономия энергии	МВтч	17,395
Конвертация в электричество		
Эффективность при выработке электроэнергии	%	37
Чистый прирост электрической энергии	МВтч/год	6,436

В настоящее время разрабатывается пилотный каплеулеуловитель для оценки конструкции и рабочих характеристик. Особое внимание уделяется образованию отложений и возможности очистки от пыли в секции Knitmesh™ нового каплеуловителя.

4. ВЫВОДЫ

Очистка доменного газа на основе циклонной технологии является проверенным решением для более эффективного удаления пыли на первом этапе процесса.

Технология сухой газоочистки на втором этапе процесса позволяет получить чистый газ с более высокой калорийностью для более эффективной работы ГУБТ и увеличения выработки электроэнергии.

Дополнительным преимуществом является отсутствие шламов.

Конструкция нового каплеуловителя занимает меньшую площадь в сравнении с традиционными осевыми установками и работает с тем же перепадом давления.

Бумади Наджи, Руле Фредерик, Алэн Журдан, Мурье Миколе, Рори Макналли, «Saint Gobain»

КЕРАМИЧЕСКИЙ СТАКАН SAINT-GOBAIN: ОБНОВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Saint-Gobain основали и развили инновационное огнеупорное решение для доменных печей на многие годы. С момента первого керамического стакана в начале 1980-ых до настоящего времени были разработаны и внедрены современные материалы, и еще более новые продукты продолжают разрабатываться даже сейчас. Керамический стакан из кирпичей Coranit Al для горна ДП получил признание на заводах по всему миру.

Несмотря на то, что за годы появилось множество альтернативных решений с керамическим стаканом от других компаний, часто с более низкими эксплуатационными характеристиками, именно название Saint Gobain до сих пор ассоциируется с понятием ‘керамический стакан’. Как следствие, после многих лет эксплуатации и везде, где это возможно, собирались и анализировались данные для оценки эволюции профиля износа керамического стакана на сиалоновой связке фирмы Saint Gobain.

Словарь терминов и аббревиатур:

ДП = Доменная Печь;

СС = Керамический Стакан (включая футеровку стен и подины);

GRW = Общая Огнеупорная Стенка (включая углеродную и керамическую футеровку);

CW = Керамическая Стенка из материалов марок Coranit или Coranit Al.

1. ВВЕДЕНИЕ

Высокоэффективная огнеупорная конструкция, производство и поставка решений огнеупорной футеровки и сервиса Saint-Gobain применяются в различных областях для производства чугуна и стали. Концепция керамического стакана была разработана и внедрена фирмой Saint-Gobain в 80-ых годах для защиты углеродной футеровки в горне ДП (Рис. 1). Керамическая стенка играет основную роль в этой философии, формируя стабильный слой, который защищает углеродную футеровку [1, 2]. Керамический стакан Saint-Gobain был поставлен и установлен почти на 100 доменных печах по всему миру, создавая референции компании для этой технологии. Последовательно было разработано два поколения материала на сиалоновой связке (Coranit и Coranit Al), чтобы противостоять тяжелым условиям в горне ДП.

Таблица 1. Некоторые характеристики конструкций ДП, изученные в статье

		Arcelor-Mittal — Dunkerque	Arcelor-Mittal — Fos-sur-Mer		ThyssenKrupp — Duisburg
		ДП-4	ДП-1	ДП-2	Schwelgern ДП-2
Дата задувки		2001	2008	2011	1993
Диаметр горна (м)		14	12,3	12,3	14,9
Внешний диаметр кожуха (м)		18,1	14,8	14,8	22
Количество леток		4	2	2	4
Угол леток		6°	9°	9°	3°
Количество фурм		40	32	32	42
Конструкция горна		Ceramic cup			
Общая огнеупорная стенка		Carbon + Ceramic			
Керамическая стенка	По всей высоте ДП	400 мм CORANIT	400 мм CORANIT Al	400 мм CORANIT Al	400 мм CORANIT
	Район слоновье ноги (если отличается)		500 мм CORANIT Al	500 мм CORANIT Al	

Были замечены следующие преимущества стенки на сиалоновой связке перед углеродной футеровкой:

- Отсутствие растворения чугуном, ненасыщенным углеродом
- Очень хорошая стойкость к коррозии шлаком и расплавленным чугуном при высокой температуре (1400°C — 1600°C)
- Очень хорошая стабильность к химическим атакам, особенно к воздействию щелочами и цинком
- Очень хорошая стойкость к окислению в случаях протечек воды
- Превосходные термомеханические свойства
- Низкая теплопроводность, ведущая к сокращению потерь тепла/энергии и расхода кокса

Износ огнеупоров горна считают основным ограничением длительности кампании ДП. В результате, выбор конструкции керамического стакана и материалов, и их монтаж принято считать крайне важным вопросом для потребителей во время ремонта футеровки [3].

Основной механизм износа в горне ДП:

- Химические реакции и коррозия/эрозия между огнеупорными материалами и продуктами плавки (расплавленным чугуном и жидким шлаком).
- Термомеханические стрессы.

Один только поток жидких продуктов плавки в горне может привести к износу огнеупорной футеровки, а комбинация с абразивными частицами и термическими стрессами может повлечь неизбежно более глубокий износ, который значительно сократит срок кампании [4].

В данной статье мы обсудим эффективность конструкций керамического стакана с применением обеих марок Coranit и Coranit Al на нескольких примерах:

- Arcelor-Mittal Dunkerque ДП-4
- Arcelor-Mittal Fos-sur-Mer ДП-1 и ДП-2
- ThyssenKrupp Steel Europe Duisburg ДП-2.

Для этих доменных печей были собраны и проанализированы фактические данные для изучения эволюции керамического стакана во время всей кампании ДП. Кроме того, был обозначен общий износ футеровки, благодаря различным датчикам, установленным по нескольким сечениям ДП.

Цель — оценить и лучше понять, как развивался профиль износа огнеупорной футеровки за время службы, чтобы улучшить наши познания и определить следующий порог развития для нашей будущей инновационной стратегии (качество материала и конструкция горна).

2. МЕТОДИКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ДАННЫХ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДП

а. Материалы для футеровки горна

Во всех изученных доменных печах применяли конструкцию с керамическим стаканом в нескольких поясах огнеупорной кладки. (Рис. 1):

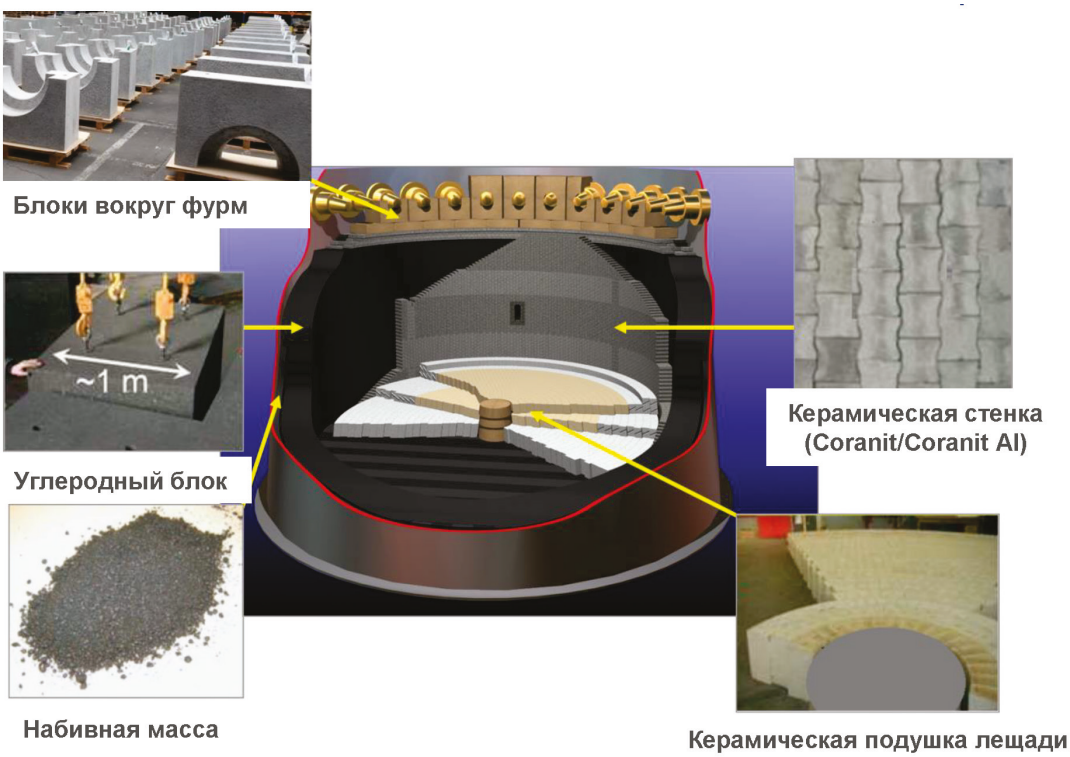


Рис. 1. Конструкция керамического стакана горна фирмы Saint-Gobain

- Керамическая подина в верхнем поясе лещади из светлых керамических материалов, объединяющих в себе высокую стойкость к механическому износу, образованию трещин и оптимальную форму соединения (стыков) огнеупорных изделий, для ограничения проникновения жидкого чугуна / его затвердевания внутри футеровки, и в тоже время для предотвращения образования слишком высоких термомеханических нагрузок.

- Район леток — крайне важная область, где еще нет четкой философии по оптимизации футеровки по качеству материалов или конструкции (кирпичи, блоки, бетоны...) [5].
- Общая огнеупорная стенка имеет конструкцию из пяти различных типов материалов:
  — Жертвенный слой огнеупорных кирпичей, обычно из шамота, используется для предотвращения значительных термических шоков во время первоначального контакта с расплавленным чугуном.
  — Керамическая стенка из корундовых кирпичей на сиалоновой связке, стойкая к воздействиям расплавленного чугуна и шлака защищает углеродный пояс от растворения. Более того, изотерма 800°C — 900°C смещается во внутрь керамики, что помогает продлить срок службы горна [6], и выполняет роль первичного барьера, защищающего от вредных веществ, вызывающих коррозию. В данной статье мы подробно изучим эволюцию износа этого пояса.
  — Специальный огнеупорный бетон применяется между керамикой и углеродом.
  — Углеродная футеровка обычно состоит из крупногабаритных блоков, и характеризуется высокой теплопроводностью и малым диаметром пор. Ее основная роль — обеспечивать низкую температуру внутренней стенки и защищать кожух от проникновения жидкого чугуна. Так как нельзя постоянно гарантировать насыщение чугуна углеродом, важно минимизировать контакт между углеродом и жидким металлом, чтобы избежать быстрой потери углерода, за счет стабильного защитного слоя, что является довольно сложной задачей.
  — Набивная масса между стальным кожухом и углеродной стенкой применяется как для снижения общего термомеханического стресса после этапа задувки, так и для обеспечения хорошего теплового контакта между стальным кожухом и углеродом.
- Внешний стальной кожух доменной печи.

b. Мониторинг температуры и анализ данных

Каждая футеровка горна оснащена термопарами для мониторинга температуры профиля внутри поясов горна на протяжении всей кампании ДП. Термопары монтируют напрямую внутри огнеупорной футеровки в определенных точках для ежеминутной регистрации локальной температуры, как средство для оценки износа огнеупорной кладки.

Эти датчики находятся вокруг кольцевой кладки и их координаты (x = радиальная позиция, y = отметка ДП), а также их количество подбирается индивидуально для каждой ДП (Рис. 2).

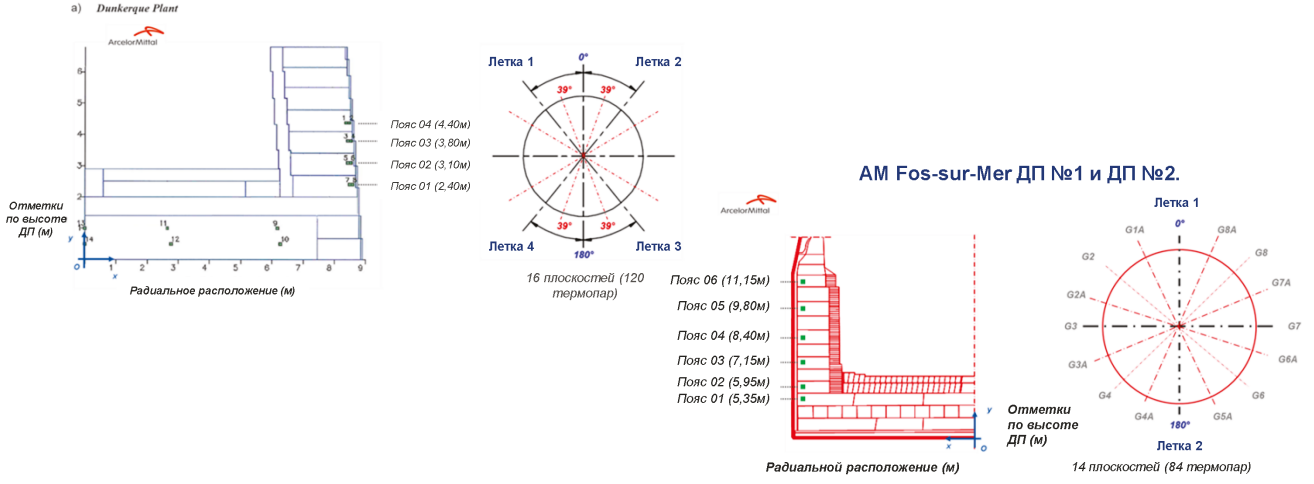


Рис. 2. Стенки горна — установка термопар (Arcelor-Mittal) соответственно для a) DunkerqueДП №°4 и b) Fos-sur-Mer ДП №°1 и №°2

В последние годы фирмой Arcelor-Mittal для моделирования профиля износа ДП было разработано программное обеспечение (Mothus), которое обеспечивает очень высокую точностью между фактиче-

скими и теоретическими данными [7]. С помощью этих данных, собранных за много лет наблюдений, мы получили доступ к эволюции профиля износа огнеупорной кладки. Благодаря этой методике Arcelor-Mittal регулярно предоставляет внутренний отчет по фактическому «возрасту» всей ДП, принимая во внимание расчетный возраст каждой части ДП, включая летки, холодильники и футеровку горна. Эти данные сопоставляются с ожидаемым профилем износа, требуемым для достижения желаемого срока службы [8]. В текущем отчете обращается внимание только на область медных холодильников, хотя ремонт этой секции произвести значительно проще, чем в горне.

Представляется логичным то, что эволюция износа может быть неравномерной по площади всей футеровки. Это связано со многими причинами, таким как асимметрия леток, локальные аварии, из-за эксплуатационных особенностей ДП, остановка и пуск ДП, протечка фурмы, локальное вдувание ильменита и т.д.

Как следствие, можно определить и измерить «слабые точки» в конкретных областях горна (худший сценарий). Однако, независимо от происхождения данной проблемы и даже если эта слабая точка локализована и не является представительной по общему профилю износа керамического стакана по всей части окружности ДП, эта слабая точка будет использована для определения фактического срока службы стен керамического стакана внутри ДП.

Далее будут обсуждаться основные показатели и результаты работы футеровки на сиалоновой связке в реальных условиях. Для Arcelor-Mittal, будет произведен глубокий анализ на основе фактических данных, а результаты для Thyssen Krupp уже предоставлены в отчете Ruther and al. 2015 [3].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

a. Arcelor-Mittal Dunkerque ДП №°4

В данной ДП были установлены стенки из кирпичей марки Coranit с первоначальной толщиной 400 мм (Рис. 2, Рис. 3). По всей площади огнеупорной кладки горна были заложены термопары на отметках высотой от 2.4 м до 4.4 м, ниже области леток.

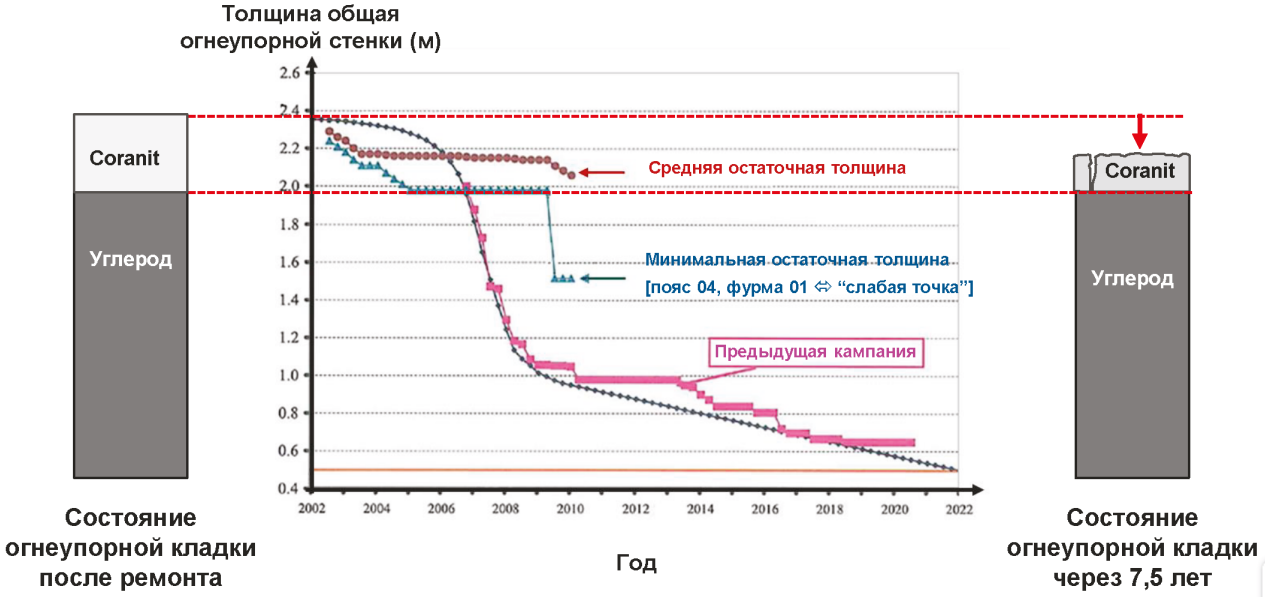


Рис. 3. Профиль износа керамического стакана из кирпичей марки Coranit. (Dunkerque Arcelor-Mittal - ДП № 4)

С момента задувки 22 ноября 2001 г. анализ рабочих параметров показал, что стенки керамического стакана еще существуют после 7.5 лет эксплуатации (Рис. 4). Средняя толщина кольцевой кладки кирпичей марки Coranit приблизительно оценивалась в 100 мм.

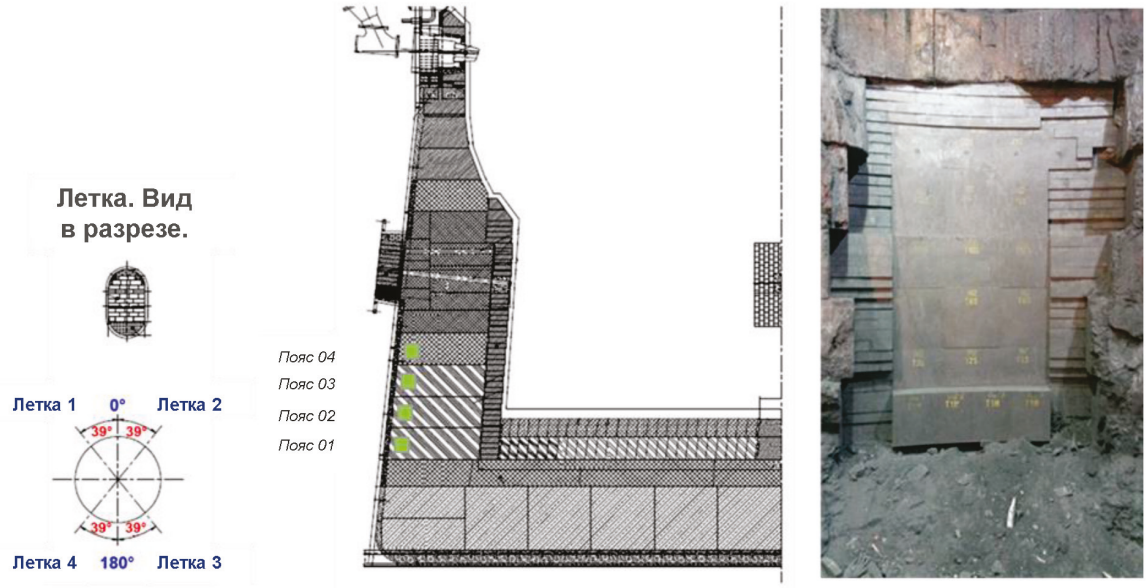


Рис. 4. Иллюстрация ремонта летки — апрель 2016 г. (Dunkerque Arcelor-Mittal — ДП №° 4)

Общий износ кирпичной кладки здесь обычен для всех сечений ДП за исключением измерений в поясе 04 сразу под фурмой № 1. По этой слабой точке срок службы стенки керамического стакана был сокращен до 7.5 лет даже без учета того, что остаточная толщина кирпичей марки Coranit еще определялась на оставшейся кольцевой кладке горна после более 8 лет (Рис. 3).

К сожалению, невозможно точно установить события во время работы ДП, которые могли бы объяснить эту локальную нестабильность. Однако, некоторые нестандартные события, возникшие вскоре после задувки ДП были внесены в отчет потребителя:

- Сразу после задувки были определены некоторые горячие точки с утечкой газа в одной области леток, которые далее развивались в пустотах между кладкой углерода и стальным кожухом. Эта проблема была устранена путем нескольких закачек пасты в различных местах кожуха.
- В 2003 г. летка № 1 была остановлена на несколько недель. Значительная часть работ проводилась с применением кислорода через аварийное отверстие для восстановления связи фурмы/летки. Скорее всего — это гипотеза, представленная потребителю.
- Трудности, которые наблюдались на каждой летке, в конечном счете привели к остановке ДП для полного ремонта района леток в апреле 2016 г. (Рис. 4).

Таблица 2. Средние данные профиля износа, измеренные через 8 лет после задувки ДП № 4

Пояса ДП №4	Отметки ДП (м)	GRW толщина (м)		Средняя эволюция износа (%)	
		Первоначально	Среднее измерение на месте	GRW	CW (Coranit)
01	2.40	2.42	2.68*	~ 0%	~ 0%
02	3.10	2.40	2.47*	~ 0%	~ 0%
03	3.80	2.38	2.16	9%	54%
04	4.38	2.35	2.06	13%	74%

GRW — общая огнеупорная стенка / CW — керамическая стенка

* Считается, что прирост толщины футеровки к первоначальной — результат затвердевания чугуна на поверхности кирпичей (гарнисаж). В итоге интенсивность износа считается близкой к 0%.

Существуют основания полагать, что эти ремонты (количество и качество закачиваемой пасты, локальные дополнительные стрессы и т.д.) или события при эксплуатации могли на местном уровне повлиять на стабильность футеровки и в какой-то степени, конечно, на появление слабых мест.

Интенсивность коррозии огнеупорной футеровки систематически повышается по высоте металлоприемника доменной печи (Табл. 2), т.е. чем выше отметка, тем выше скорость коррозии. Данный факт говорит о существовании градиента эрозии в зоне, начинающейся под летками и опускающейся до лещади.

Во множестве работ по моделированию отмечено, что распределение теплового потока в горне и распределение температуры в горячем металле и огнеупорах [9, 10, 11, 12, 13] зависит от нескольких часто зависимых факторов, таких как:

- Движение потока жидких продуктов плавки в результате дневных выпусков через летки [14]. В данном процессе значимый локальный характер потока в горне ДП, особенно в районе отсутствия кокса, также возникает, когда все летки закрыты
- Воздействие растворения углерода: максимум в зоне высоких скоростей около и вокруг леток [14].

b. Arcelor-Mittal — Fos-sur-Mer

В обеих доменных печах (ДП № 1 и ДП № 2), в стенке были установлены кирпичи толщиной 400 мм марки Coranit Al. Термопары заложены симметрично по всей окружности горна от отметки 5.3 м до 11.2 м (Рис. 3). Конструкция печей одинакова.

i. ДП № 1

В первые 8 лет после задувки печи 10 января 2008 г. замечаний не было. По оценкам модели предполагаемого профиля износа Mothus, стенки из кирпичей Coranit Al еще оставались в ДП по всей площади горна без каких-либо слабых мест (Табл. 3).

Таблица 3. Данные профиля износа через 8 лет после задувки ДП № 1 (Arcelor-Mittal - Fos-sur-Mer)

Пояса ДП №1	Отметки ДП (м)	GRW толщина (м)		Средняя эволюция износа (%)	
		Первоначально	Среднее измерение на месте	GRW	CW (Coranit Al)
01	5.35	1.83	1.83	~ 0%	~ 0%
02	5.95	1.83	1.80	1%	5%
03	7.15	1.73	1.58	9%	37%
04	8.40	1.73	1.60	7%	31%
05	9.80	1.73	1.59	8%	35%
06	11.15	1.58	1.39	12%	48%

GRW — общая огнеупорная стенка / CW — керамическая стенка

Если мы рассмотрим наиболее изношенные участки (пояса 03–06), 62% от первоначальной толщины кирпичей Coranit Al еще сохранились в горне, что соответствует остаточной толщине кирпичей около 248 мм.

Профиль коррозии достаточно равномерен по всей высоте металлоприемника (Рис. 5). Однако, незначительно более сильная коррозия была отмечена сразу под фурменным поясом (отметка +11.15 м). Профиль износа также симметричен по всей периферии ДП без каких-либо «слабых точек», возникших во время эксплуатации ДП.

Например, в сравнении со средними значениями, указанными на Рис. 7, минимальная интенсивность эрозии общей огнеупорной стенки была 17%, как в районе фурм (пояс 06), так и на уровне подушки лещади (пояс 03).

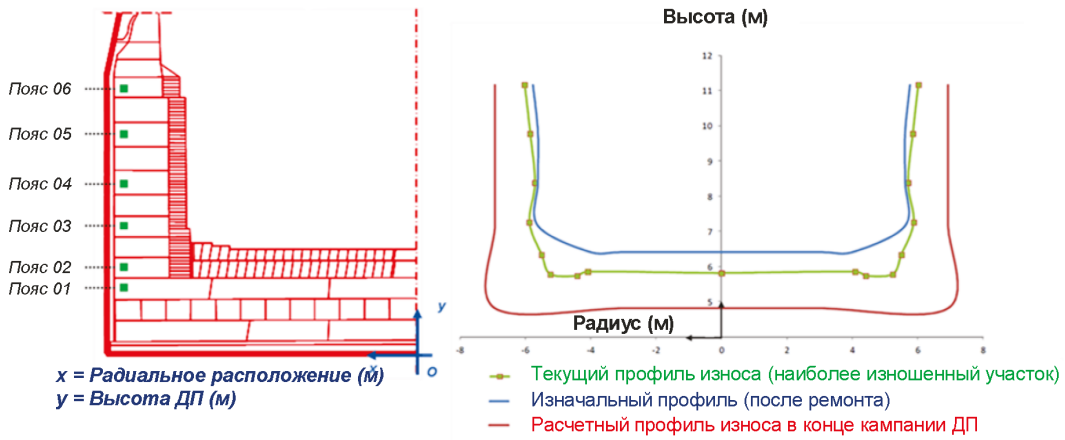


Рис. 5. Профиль износа после 8 лет (Fos-sur-Mer — Arcelor-Mittal — ДП № 1)

Эти наблюдения и измерения подтверждают, что футеровка Coranit Al еще существует по всей высоте металлоприемника и имеет симметричный профиль износа по всей площади. Это заключение полностью подтверждается потребителем. Стенки из кирпичей Coranit Al продолжают активно защищать углеродную кладку после 8 лет мин, и способствуют увеличению срока службы ДП.

ii. ДП № 2

Эта ДП была задута 19 сентября 2011 г. Вполне ожидаемо было обнаружено, что футеровка на сиалоновой связке еще сохранилась в горне ДП после 4.5 лет эксплуатации. Если мы рассмотрим наиболее изношенные участки (пояса 03–06), то средняя остаточная толщина кирпичей Coranit Al составила около 257 мм.

Таблица 4. Данные профиля износа через 8 лет после задувки ДП № 1 (Arcelor-Mittal - Fos-sur-Mer)

Пояса ДП №1	Отметки ДП (м)	GRW толщина (м)		Средняя эволюция износа (%)	
		Первоначально	Среднее измерение на месте	GRW	CW (Coranit Al)
01	5.35	1.83	1.80	1%	5%
02	5.95	1.83	1.80	1%	5%
03	7.15	1.73	1.56	10%	41%
04	8.40	1.73	1.59	8%	33%
05	9.80	1.73	1.60	7%	31%
06	11.15	1.58	1.43	10%	38%

GRW — общая огнеупорная стенка / CW — керамическая стенка

Схожие наблюдения были сделаны для этой ДП, как и для ДП №1, с однородным профилем износа по всей высоте металлоприемника ДП (Рис. 6) и симметричным профилем по всей периферии ДП. Например, в самой изношенной точке района ‹слоновьей ноги›, остаточная толщина общей огнеупорной стенки составила около 1.43 м, что соответствует 17% износа (10% в среднем).

iii. Сравнительный анализ между ДП №1 и ДП №2

См. сравнение между двумя доменными печами в течение одного периода времени 4.5 года на рис. 7. Оба профиля износа схожи, даже если интенсивность эрозии в районе ‹слоновьей ноги› (район стыка горна и лещади) ДП № 2 может показаться сильнее (рис. 7).

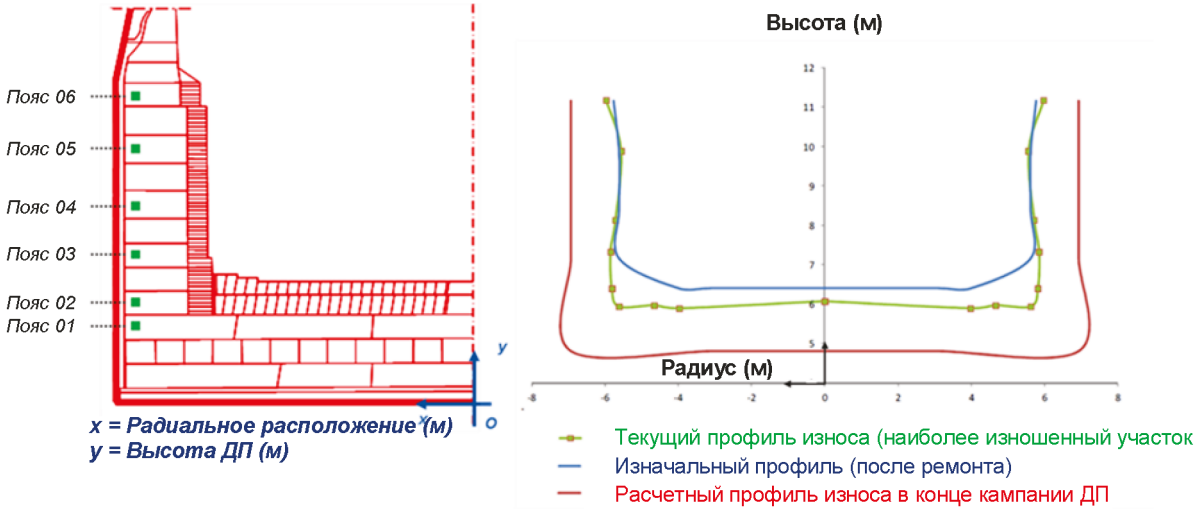


Рис. 6. Профиль износа после 4.5 лет (Fos-sur-Mer — Arcelor-Mittal — ДП № 2)

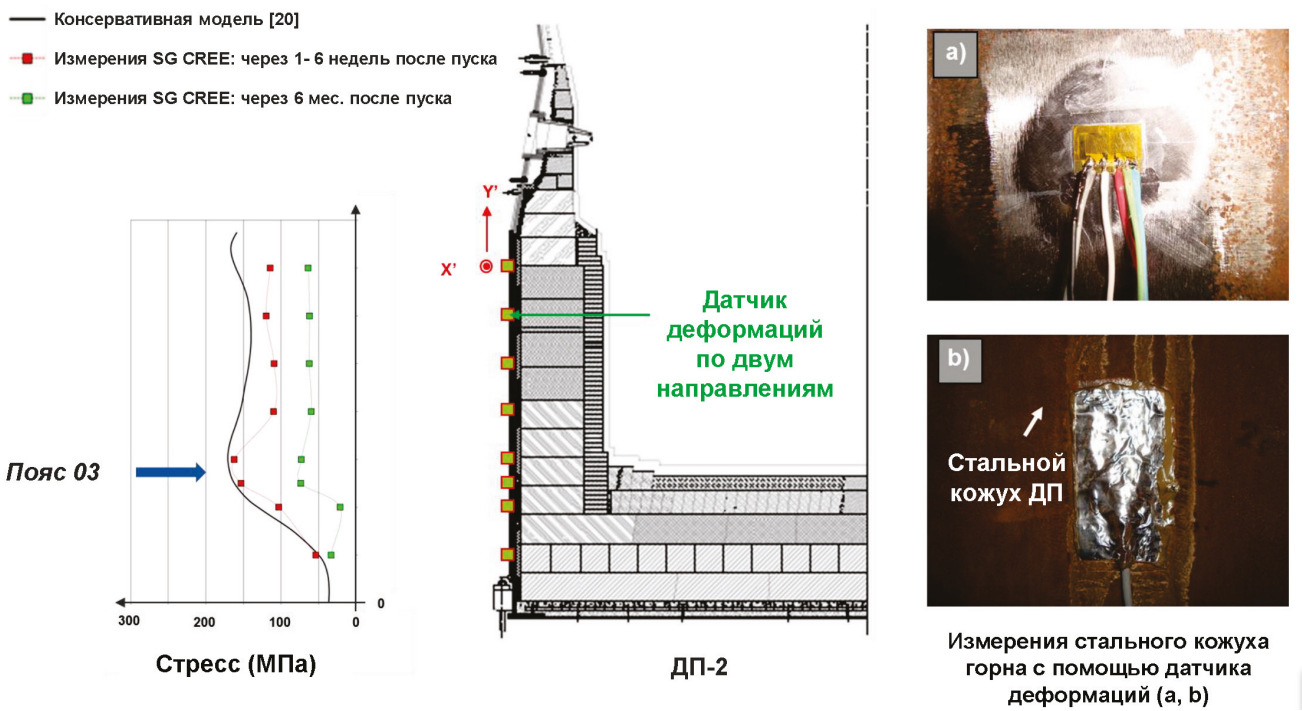


Рис. 7. Эволюция стресса на стальном кожухе ДП № 2 после задувки. Иллюстрация максимального стресса, зафиксированного на отметке 7.15 м

Более того, остаточная толщина кирпичей Coranit Al в ДП № 2 составила около 59% в сравнении с 87% в ДП № 1, что обусловлено образованием зоны «слоновьей ноги», которая будет контролироваться и регулярно проверяться в ДП № 2.

Результаты мониторинга горна соответствуют проведенным стресс-тестам на стальном кожухе ДП № 2 при задувке в 2011 г. Как ожидалось теоретически [20], эти измерения на месте подтверждают, что зона ‹слоновьей ноги› [21], подвергается максимальному стрессу после задувки (Рис. 7).

Эта особенно важная область до сих пор является зоной максимального стресса даже после ослабления стресса, который начался через 2 месяца. К сожалению, на ДП № 1 подобный анализ не проводился и уровень стресса нельзя сравнить последовательно.

Таблица 5. Данные профиля износа через 8 лет после задувки ДП № 1 (Arcelor-Mittal — Fos-sur-Mer)

Пояса ДП	Отметки ДП (м)	Среднее измерение на месте для GRW (м)		Средняя эволюция износа для GRW (%)		Средняя эволюция износа для CW (Coranit Al) (%)	
		ДП № 1	ДП № 2	ДП № 1	ДП № 2	ДП № 1	ДП № 2
01	5.35	1.83	1.80	~ 0%	1%	~ 0%	5%
02	5.95	1.83	1.80	~ 0%	1%	~ 0%	5%
03	7.15	1.67	1.56	3%	10%	13%	41%
04	8.40	1.61	1.59	7%	8%	30%	33%
05	9.80	1.61	1.60	7%	7%	30%	31%
06	11.15	1.41	1.43	10%	10%	41%	38%

c. ThyssenKrupp Steel Europe — Duisburg Schwelgern ДП № 2 (Кампания с 1993 по 2014)

В 1993 Schwelgern II считалась одной из самых больших ДП в мире с оборудованной в горне стенкой из кирпичей Coranit толщиной 400 мм (Рис. 8). Концепция огнеупоров, включая выбор материалов и конструкции — основные критерии для продления срока службы ДП для ThyssenKrupp. Как следствие, для этой доменной печи в рамках задачи по увеличению кампании применили сочетание специальной формы огнеупорных изделий (малоразмерные кирпичи) и улучшенную замковую конструкцию [3].

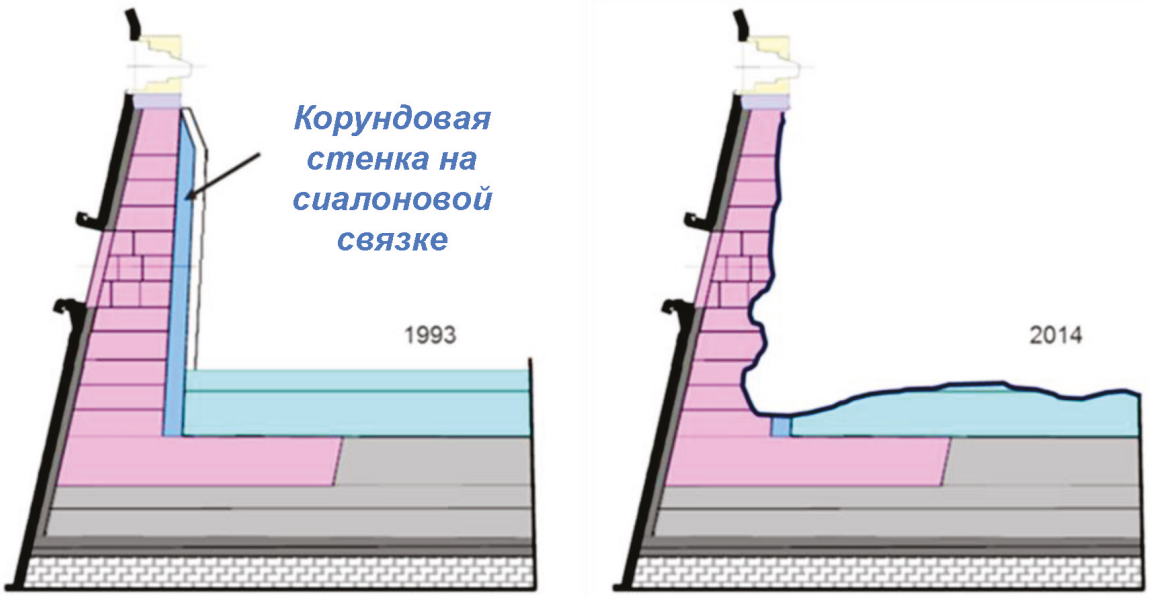


Рис. 8. Эволюция профиля износа футеровки горна ДП № 2 Schwelgern (1993–2014) [3]

Задувка печи состоялась 28 октября 1993. Рабочие параметры показывали, что стенка керамического стакана сохранялась в горне 9 лет, и дальнейшие 12 лет печь работала с углеродной футеровкой [3]. Общий срок кампании составил 21 год, что значительно превысило ожидания потребителя (Рис. 8).

Благодаря этим результатам можно утверждать, что эффективность концепции керамического стакана Saint-Gobain была подтверждена, и прямым следствием этого заключения явилось то, что потребитель изучает возможность изменить конструкцию в будущем, путем увеличения толщины керамической стенки на 50%.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Благодаря тесному сотрудничеству с нашими потребителями был собран большой объем данных напрямую с производственных площадок и проведен анализ для оценки профиля износа огнеупорной футеровки. Керамический стакан Saint-Gobain со стенками из изделий марок Coranit или Coranit Al показывает симметричный износ с момента задувки и в течение всей кампании ДП. Существуют основания утверждать, что футеровка Saint- Gobain на сиалоновой связке может присутствовать в горне ДП после более чем 7.5 лет эксплуатации. Доступные к настоящему моменту технические отчеты по работе ДП с керамическим стаканов говорят о том, что данные результаты до сих пор не были достигнуты при использовании альтернативных керамических футеровок [22, 23].

Износ огнеупоров характеризуется симметричным профилем эрозии по всему диаметру. При оценках стойкости керамического стакана нельзя исключать районы локального преждевременного износа, который в любом случае сокращает срок службы всей керамической стенки, как, например, наблюдалось в случае с ДП № 4. Иными словами, целостности круговой керамической кладки могут угрожать причины, которые связаны с условиями эксплуатации ДП, особенно локальный направленный поток жидких продуктов плавки с появлением горячих точек, аварии в медных холодильниках или летках, какие-либо симметричные действия и т.д., которые могут напрямую повлиять на интенсивность износа футеровки.

Профиль износа достаточно однороден по всей высоте металлоприемника ДП с незначительно более высокой интенсивностью износа в последнем поясе под фурменной областью. На самом деле это не удивительно, так как известно, что эта область является самой горячей зоной горна, которая находится в прямом контакте с высоко коррозийным шлаком. Чрезмерная эрозия отмечается в зоне слоновьей ноги, где самый высокий механический стресс. Это обычный феномен для каждой ДП, о чем шла речь выше, подтвержденный окончательным профилем износа Schwelgern II. Будет интересно изучить конечные характеристики износа в этой области на доменных печах Arcelor-Mittal в Fos-sur-Mer после исчезновения керамического стакана для определения того, что быстрее изнашивается керамическая или углеродная футеровка.

Учитывая скорость износа, очевидно, что керамическая стенка эффективно защищает углерод более 7.5 лет. Это наблюдение можно обосновать свойствами керамики на сиалоновой связке, особенно ее высокой стойкостью к чугуну и шлаку одновременно с превосходной стабильностью к различным химическим воздействиям. Многие потребители сообщают, что во время демонтажа ДП [15, 24] охрупченный пояс обычно локализован, и наблюдается в остаточной углеродной футеровке. Влияние этого феномена удалось значительно снизить благодаря применению керамической стенки [15], которая удерживает изотермы конденсации щелочей внутри керамических кирпичей, а не в углеродном поясе. В этом ключе вырисовывается новая конструкция с увеличением толщины кирпичей, чтобы удержать эту изотерму внутри керамической футеровки как можно дольше для увеличения срока службы ДП.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С того момента, как Saint-Gobain начали продвигать новую концепцию керамического стакана на сиалоновой связке, потребовалось более 20 лет интенсивной последовательной работы, чтобы отследить и измерить преимущества нашего изобретения. В этой статье отмечены обобщенные и фактические данные существенных преимуществ защитного керамического стакана конструкции Saint-Gobain, установленного перед углеродной футеровкой ДП. Сегодня у нас есть все основания полагать, что эта керамическая футеровка сохраняется в горне свыше 7.5 лет, в полном объеме выполняя свою функцию по защите углеродной кладки. Эти преимущества, которые отмечают все наши покупатели, побуждают наиболее смелых и передовых из них, разрабатывать новые конструкции футеровки ДП на основе увеличенной толщины керамического стакана, и ставят перед нами задачу разработать новое поколение керамики с еще более высокими показателями, чем у Coranit Al.

Эта новая конструкция объединяет в себе одновременно увеличенную толщину и новое качество материалов, являясь частью стратегии фирмы Saint-Gobain по усилению лидирующей позиции в сегменте ке-

рамических огнеупоров для черной металлургии, направленной на то, чтобы сделать наш керамический стакан основным средством, способствующим увеличению срока службы и эффективности горна ДП.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем нашу глубокую благодарность компаниям Arcelor-Mittal и ThyssenKrupp за то, что они поделились своими знаниями и опытом. Спасибо за доверие, предоставленные данные и разрешение на их использование в данной публикации.

Список литературы

[1] Jian Liu; Weidong Wang; Yin Fang; Ruitu Xu; Rusheng He; Yongguo CaO; Rory McNally; Stefan Basista. Analysis of Performance of Ceramic Cup and Carbon Hearth Lining used in Shagang 5800 m3 BF. *9th India International Refractory Congress in Kolkata. 02-04/02/2012.*

[2] F. Roulet, E. Jorge, N. Boumahdi, R. McNally. *Latest advances in refractory for blast furnace.* METEC Insteelcon Congress — Life extension of blast furnaces — 30/06/2011.

[3] Peter Ruther, Michael Peters. *Requirements for a campaign life of more than 20 years at Blast Furnace 2 of ThyssenKrupp Steel Europe.* Proceedings METEC Congress & 2nd ESTAD conference, Dusseldorf, Germany, 2015.

[4] Desai, B., Ramna, R. V., & Dash, S. K. (2006). *Optimum coke-free space volume in blast furnace hearth by wall shear stress analysis.* ISIJ international, 46(10), 1396–1402.

[5] Nelson, L. R., & Hundermark, R. J. (2014). *The tap-hole'-key to furnace performance.* In Furnace Tapping Conference 2014 (pp. 1–32). Johannesburg: Southern African Institute of Mining and Metallurgy.

[6] *Raipala, Kalevi.* On hearth phenomena and hot metal carbon content in blast furnace. *Helsinki University of Technology, 2003.*

[7] J.L. Eymond, M. Picard, M.J. Venturini, S.A. Zaimi, C. Franssen, G. Masson, J.M. Dyrda. *MOTHUS: a thermal wear model for the hearth ofthe blastfurnace.* The international ATS Steelmaking Conference. 9-10th of December 2004.

[8] Zaimi, S. A., Campos, T., Bennani, M., Lecacheux, B., Danloy, G., Pomeroy, D., & Perez-Chust, R. (2009). Blast Furnace models development and application in ArcelorMittal Group. *Revue de Metallurgie,* 106(3), 105111.

[9] *Huang, C. E., Du, S. W., & Cheng, W. T. (2008).* Numerical investigation on hot metal flow in blast furnace hearth through CFD. *ISIJ international,* 48(9), *1182–1187.*

[10] Shibata, K., Kimura, Y., Shimizu, M., & Inaba, S. I. (1990). *Dynamics of dead-man coke and hot metal flow in a blastfurnace hearth.* ISIJ International, 30(3), 208–215.

[11] Zhang, Y., Deshpande, R., Huang, D. F., Chaubal, P., & Zhou, C. Q. (2008). *Numerical analysis of blast furnace hearth inner profile by using CFD and heat transfer model for different time periods.* International journal of heat and mass transfer, 51(1), 186–197.

[12] Panjkovic, V., Truelove, J. S., & Zulli, P. (2002). *Numerical modelling of iron flow and heat transfer in blast furnace hearth.* Ironmaking & steelmaking, 29(5), 390–400.

[13] *Cheng, W. T., Huang, C. N., & Du, S. W. (2005).* Three dimensional iron flow and heat transfer in the hearth of a blastfurnace during tapping process. *Chemical engineering science, 60(16), 4485–4492.*

[14] Post, J.R., Peeters, T., Yang, Y., Reuter, M.A., (2003), «*Hot metal flow in the blast furnace hearth: thermal and carbon dissolution effects on buoyancy, flow and refractory wear*». Proceedings of the 3rd International Conference on Computational Fluid Dynamics in the Minerals & Process Industries, eds. P.J. Witt and M.P. Schwarz, CSIRO Australia, 10–12 December, Melbourne. 433–440.

[15] Rodi. Reduction of iron ores. *Effect of hearth liquid level upon blast furnace operation.* Stahlinstitut VDEh, Technical steel research. 2000. pp. 1–193.

[16] Lei Shao. *Model-based estimation of liquid flows in the blast furnace hearth and taphole.* Doctoral Thesis of Thermal and Flow Engineering Laboratory. Finland 2013.

[17] *James R. Post, Donna Tognarelli, Jan Van Der Stel. Yongxiang Yang, Markus A. Reuter.* Hot metal flow in the hearth of a blast furnace: influence of dynamic changes in dead man porosity due to coke dissolution and coke size changes. *Paper — 5th ECIC — full paper final. 2005.*
[18] Gonzalez, R., Barbes, M. A., Verdeja, L. F., Ruiz-Bustinza, I., Mochon, J., Duarte, M. R., ... & Migas, R. (2011). *Mechanisms knowledge of the flow and wear in the blast furnace crucible with the nodal wear model.* Metallurgy and Foundry Engineering, 37(2), 123–132.
[19] Hong-Wei Guo, Bing-Ji Yan, Jian-Liang Zhang, He-Lan Liang and Yi-Li Liu. *Influence of Hot Metal Flow State to the Hearth Flow Field during Blast Furnace Tapping.* Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 6(13): 2409–2414, 2013.
[20] Brulin, J. (2010). *Modelisation thermomecanique d'un creuset de haut fourneau.* Doctoral Thesis of Orleans University.
[21] *Maria Swartling.* A Study of the Heat Flow in the Blast Furnace Hearth Lining. *Doctoral Thesis of Stockholm 2010.*
[22] Zheng-jian LIU; Jian-liang ZHANG; Hai-bin ZUO; Tian-jun YANG. *Recent Progress on Long Service Life Design of Chinese Blast Furnace Hearth.* ISIJ International, Vol. 52 (2012), No. 10, pp. 1713–1723.
[23] Albert J. Dzermejko. *The End of Carbonaceous Blast Furnace Hearth Working Linings?* AISTech Conference Proceedings. 2015.
[24] Silva, S. N., Vernilli, F., Justus, S. M., Marques, O. R., Mazine, A., Baldo, J. B., ... & Varela, J. A. (2005). Wear mechanism for blast furnace hea.

Макото Гото, «Nippon Steel & Sumikin Engineering»

ДОЛГОВЕЧНЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ МЕДНЫЕ ХОЛОДИЛЬНИКИ, РАЗРАБОТАННЫЕ NIPPON STEEL & SUMIKIN ENGINEERING

АННОТАЦИЯ

Примерно с 1990-х годов, многие доменные печи использовали вертикальные медные холодильники. Предполагалось, что вертикальные плитовые медные холодильники могут служить 20 лет благодаря их параметрам охлаждения, однако в некоторых случаях установка этих холодильников приводила к проблемам. Эти проблемы можно условно разделить на три типа: деформация, образования трещин в сварных швах, вызванных термической усталостью и абразивный износ на внутренней поверхности холодильника. В худшем случае вертикальные медные холодильники требовали замены через несколько лет.

Выход из строя холодильника сильно влияет на стабильную работу печи, и поэтому меры предотвращения этого являются очень важным вопросом.

Данная статья представляет технологию производства нового типа вертикальных медных холодильников с залитыми стальными трубами, разработанную NIPPON STEEL & SUMIKIN ENGINEERING (NSENGI) на основе своего большого опыта и ноу-хау производства чугунных холодильников из чугуна с шаровидным графитом в течение последних 40 лет. Предлагаемые холодильники с залитыми стальными трубами имеют оригинальные и революционные характеристики, решающие указанные выше проблемы.

При внедрении вертикальных медных холодильников с залитыми стальными трубами устраняются или в значительной мере снижаются риски возникновения проблем, а также снижаются эксплуатационные затраты для обеспечения стабильной работы доменной печи.

1. ВВЕДЕНИЕ

Так как замена футеровки доменной печи требует больших затрат, на протяжении многих лет разрабатывалось и улучшалось оборудование доменных печей для увеличения их срока службы. Одним из таких технических решений являются холодильники доменных печей.

NIPPON STEEL & SUMIKIN ENGINEERING (ранее NIPPON STEEL Co) усовершенствовала чугунные вертикальные холодильники с первого и по четвёртое поколение, увеличив их срок службы с момента внедрения данной технологии по лицензии из СССР в 1969г. В результате, срок службы доменных печей увеличился сначала с 5 до 7 лет, и в последующих годах с 15 до 16 лет. Чугунные вертикальные холодильники были поставлены примерно на 180 доменных печей как внутри страны, так и за рубежом, внося свой вклад в увеличения срока службы доменных печей.

Однако в последние годы из-за требований увеличить срок службы до 20 лет и более, потребовались разработки вертикальных медных холодильников для замены чугунных в высокотемпературных зонах доменной печи. Медные холодильники начали внедрять в Германии с середины 1990 г., и в настоящий момент они используются на многих доменных печах.

В основном медные холодильники сделаны из катаной меди со сверленными охлаждающими каналами и приваренными к ним трубами для подачи и слива охлаждающей воды. Процесс производства неизбежно включает сварку на концах каналов и мест соединения труб.

Термическая усталость в зонах сварки и концентрации нагрузок при тепловой деформации приводит к появлению трещин, что в свою очередь может привести к утечке охлаждающей воды в доменную печь.

Также в последние годы возникли проблемы с износом внутренней поверхности холодильников, приводящие к утечке воды. В худших случаях утечка воды появляется через несколько лет после ввода в эксплуатацию доменной печи.

Проблема с утечкой воды из медных холодильников не только требует крупномасштабной замены, но также наносит большой ущерб стабильной работе печи. Таким образом, появилось острая потребность в долговечных и высоконадежных вертикальных медных холодильниках.

Для решения данной проблемы NIPPON STEEL & SUMIKIN ENGINEERING разработала свои долговечные и высоконадежные медные холодильники с залитыми стальными трубами, основываясь на своем опыте производства холодильников с шаровидным графитом совершенствовавшемся на протяжении 40 лет, Такие холодильники работают на некоторых действующих доменных печах уже с 2003 г. Данный доклад описывает основные характеристики и технологию долговечных медных холодильников с залитыми стальными трубами.

2. ПРОБЛЕМЫ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ МЕДНЫМИ ХОЛОДИЛЬНИКАМИ

Проблемы с вертикальными медными холодильниками и причины их возникновения в значительной степени могут быть классифицированы на следующие три пункта:

1) Деформация

Вертикальный холодильник подвергается деформации из-за разницы теплового расширения между подверженной высоким температурам внутренней поверхностью и и охлаждаемой внешней поверхностью. Холодильник деформируется, если он слишком длинный или положение болтов крепления установлено ненадлежащих образом.

Деформация холодильника приводит к его износу или к поломке сварных швов, через которые выходит сильно нагретый газ, вызывая утечку воды.

Проблемы деформации могут быть решены путем расчета длины и определения правильных мест крепления.

2) Появление трещин на сварных швах из-за тепловой усталости

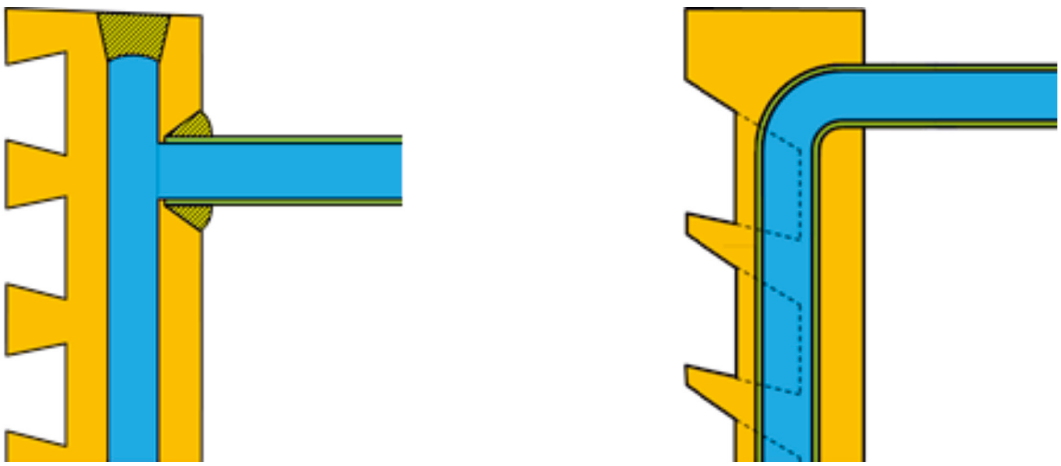
Тепловая нагрузка, многократно влияющая на сварной шов при тепловом колебании в течение эксплуатации, приводит к трещине или поломке.

3) Абразивный износ

Износ медного холодильника возникает из-за оседания железной руды и кокса, имеющих более высокую твердость, чем медь на передней поверхности холодильника. В общем, считается, что скорость образования износа зависит от контактного усилия и скорости падения шихты на поверхность холодильника, твердости меди, а также твердости и формы шихты.

3. ТЕХНОЛОГИЯ УВЕЛИЧЕНИЯ СТОЙКОСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ МЕДНЫХ ХОЛОДИЛЬНИКОВ С ЗАЛИТЫМИ СТАЛЬНЫМИ ТРУБАМИ

Характеристики вертикальных медных холодильников с залитыми стальными трубами против вышеописанных проблем.



Традиционные медные холодильники *Медные холодильники с залитыми стальными трубами*

Рис. 1. Традиционные медные холодильники и медные холодильники с залитыми стальными трубами

3.1. Конструкция без сварных швов, исключающие их поломки

Залитые стальные трубы в меди образуют охлаждающие каналы, не требующие сварки концов и мест соединения труб, которые неизбежно возникают при производстве традиционных медных холодильников

Устранение сварных швов удаляет проблемы с поломками сварных швов.

3.2. Износостойкость

Как описывалось выше, считается, что износ на медном холодильнике зависит от контактной силы на переднюю поверхность, скорость падения, твердости меди, твердости и формы шихты.

Таким образом, для снижения износа медного холодильника важно уменьшить силу контакта, скорость падения без снижения твердости меди.

3.2.1. Уменьшение контактной силы и скорости падения шихты при помощи направленных вверх ребер

В отличие от традиционных медных холодильников с механически обработанными ребрами, ребра медных холодильников с залитыми стальными трубами могут принять любую форму, так как они изготавливаются при литье самого холодильника. Используя это преимущество, NSENGI разработали ребра, направленные вверх, которые уменьшают контактное усилие и скорость падения шихты. (См рис. 2.)

Так как ребра на традиционных медных холодильниках короткие, шихта, попав между ребрами, почти что не двигается. В результате, при падении шихта не задерживается на передней поверхности

холодильника, как это показано на рис. 3. Напротив, ребра на холодильниках с залитыми стальными трубами длинные и направлены вверх, образуют восходящий поток шихты. Тем самым, шихта образует гарнисаж. Этот механизм помогает уменьшить контактную силу и скорость падения шихты на передней поверхности холодильника.

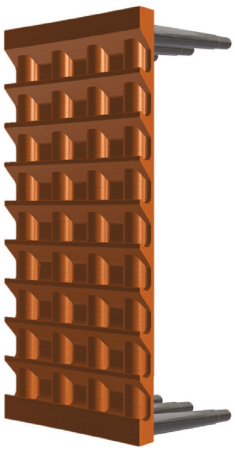


Рис. 2. Медный холодильник с залитыми стальными трубами с направленными вверх ребрами

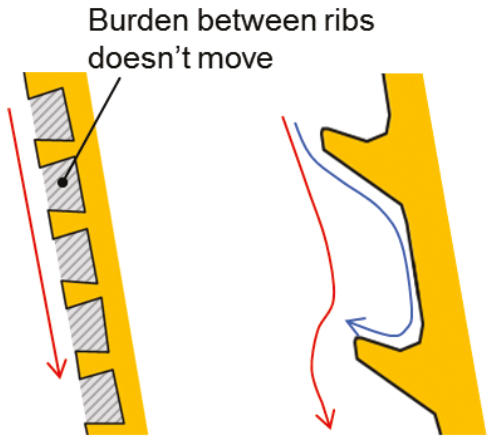


Рис. 3. Сравнение потока шихты между ребрами традиционных и направленными вверх ребрами холодильников

Рис. 4 показывает результаты анализа поведения шихты при падении, сделанные методом дискретных элементов (DEM). Как можно видеть, на направленных вверх ребрах образуется защитный слой.

Этот механизм снижает контактное усилие на верхнюю часть ребер на 40% и скорость падение шихты на 60–70%, чем увеличивает срок службы холодильника примерно в четыре раза.

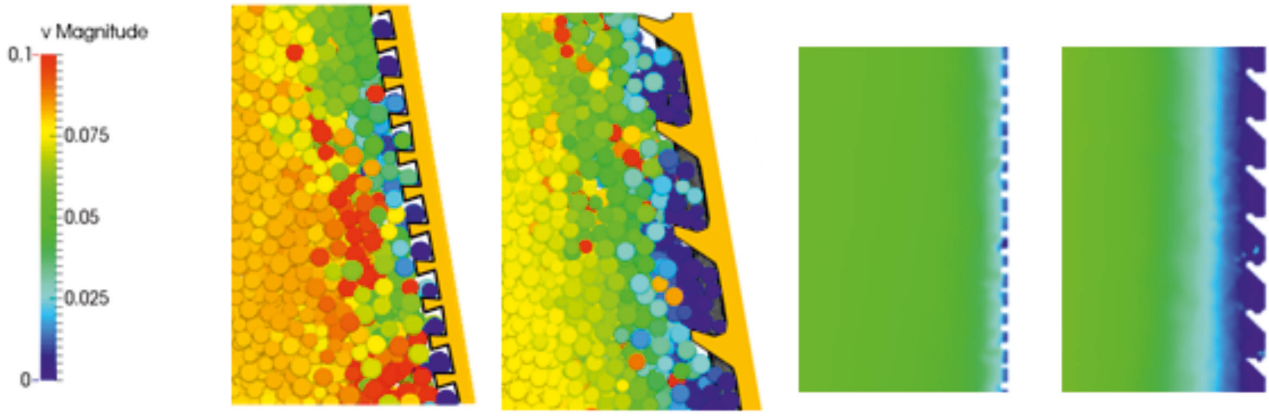


Рис. 4. Моделирование падения шихты методом дискретных элементов

3.2.2. Эффективность охлаждения и ее надежность

Помимо контроля износа, было необходимо сохранить эффективность охлаждения, не снизив при этом твердость меди.

При применении стальных труб в медном холодильнике были опасения, что эффективность охлаждения будет нарушена из-за наличия стальных труб, которые имеют низкую теплопроводность и могут отслоиться от меди. Однако эти опасения были решены технологией, описываемой далее.

1) Эффективность охлаждения

В таблице 1 показана теплопроводность меди, использованной в холодильниках из катанной меди, литого типа и с залитыми стальными трубами. Медные холодильники с залитыми стальными трубами

компенсируют теплопроводность, используя медь высокой чистоты 99.9% по сравнению с традиционным медным литым холодильником.

Таблица 1. Теплопроводность меди

Тип медного холодильника	Материал	Чистота меди	Теплопроводность [ккал/м-ч-°C]
Сверленными каналами	Катаная медь	≥99.9%	315
Литой	Литая медь (CA101)	≥99.5%	173
С залитыми стальными трубами	Литая медь (CA103)	≥99.9%	260
	Стальная труба	—	40

На рис. 5 показаны результаты трехмерного анализа теплопроводности на разных типах медных холодильников. На рисунке видно, что медный холодильник с залитыми стальными трубами поддерживает низкую температуру в доменной печи по сравнению с литым медным холодильником. Это подтверждается наличием множества фактических данных. В традиционных медных литых холодильниках нет проблем с недостаточностью охлаждения. Поэтому холодильники с залитыми трубами имеют достаточную эффективность охлаждения.

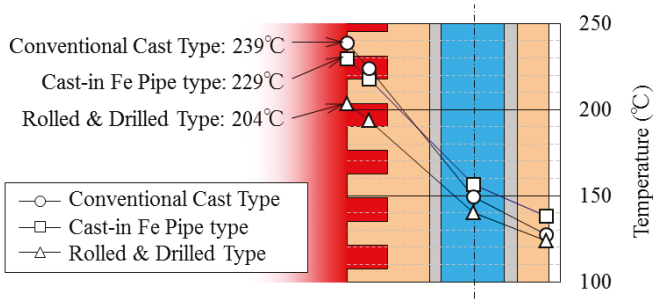


Рис. 5. Результаты анализа теплопроводности

2) Адгезия меди и стальной трубы

Используя стальные трубы для сохранения эффективности охлаждения, было важно предотвратить отслаивание стальной трубы от меди при постоянных колебаниях температуры в печи. При отслоении стальной трубы от меди теряются характеристики теплообмена, что приводит к увеличению температуры меди. Для устранения отслоения NSENGI разработали свою оригинальную технологию адгезии меди с стальной трубой.

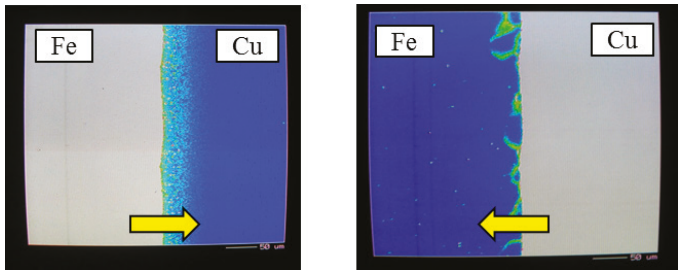


Рис. 6. Наблюдение за структурой стальной трубы и меди с использованием ЭЗМА

Рис. 6 показывает результаты наблюдений металлографической структуры меди и стальной трубы с использованием ЭЗМА (электро-зондового микроанализа). На левой фотографии показано распределение железа, а на правой меди. Как видно оба металла образуют прочную адгезию.

В дополнение для проверки адгезии между медью и стальной трубой были проведены испытания на предел прочности на разрыв и испытания на срез при температуре 400°C.

На рис. 7 показаны результаты испытаний на разрыв и на рис. 8 показаны результаты испытания на срез. Результаты обоих испытаний показали, что прочность адгезии выше, чем у меди.

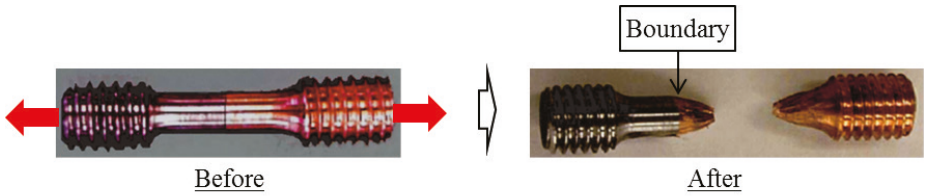
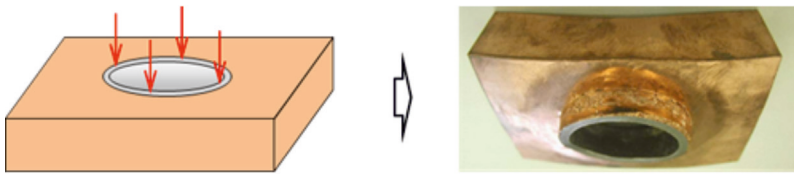


Рис. 7. Оценка адгезии по пределу прочности на разрыв



До *После*

Рис. 8. Оценка адгезии на предел прочности на сдвиг

Также были проведены испытания на проверку отслаивания и теплопроводность меди и стальной трубы после повторного нагрева. Условия испытания показаны на рис. 9. При испытании верхняя часть нагревалась до температуры 400°C горелкой, установленной на расстоянии 10 мм от стальной трубы, с подачей через нее воды для охлаждения образца. Данные испытания были проведены 20 раз (см. рис. 10). Каналы охлаждения расположены на 50 мм от поверхности медных холодильников, температура которых составляет примерно 200–250°C при фактической работы доменной печи. Условия же испытания образца были значительно выше, чем при фактической работе печи.

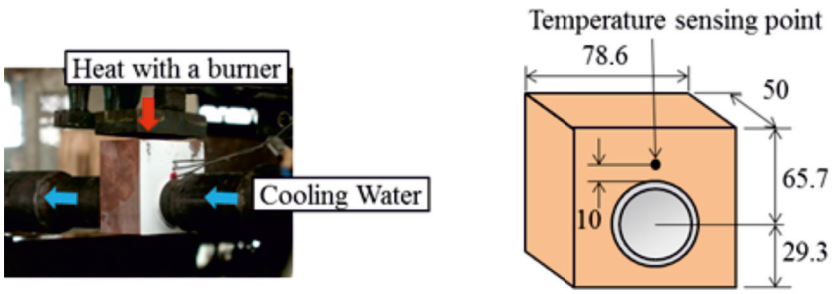


Рис. 9. Испытание образца на тепловой шок

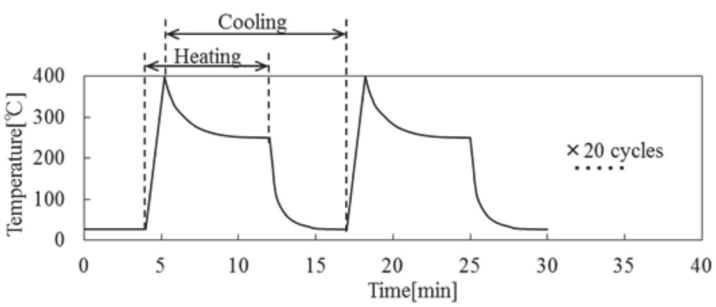


Рис. 10. График тепловой нагрузки

По результатам испытаний даже после тепловой нагрузки, на образце не было выявлено отслоения на поверхности адгезии и снижения теплопроводности. Испытания подтвердили, что при условиях фактической работы печи в холодильнике не образуется отслоение и не теряется теплопроводность.

В заключение можно сказать, что медные холодильники с залитыми стальными трубами не теряют теплопроводность, и нет отслоения стали от меди в условиях фактической работы печи.

4. ДРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРТИКАЛЬНОГО МЕДНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА С ЗАЛИТЫМИ ТРУБАМИ

Вертикальный медный холодильник с залитыми трубами имеет следующие характеристики, помимо долговечности.

4.1. Проектирование с высокой степенью свободы

В доменных печах с чугунными холодильниками при их выходе из строя или в связи с требованиями увеличения стойкости холодильников , их можно заменить медными.

В этом случае медные холодильники со сверленными каналами имеют ограничения из-за невозможности адаптации их к существующим охлаждающим каналам в местах замены. С другой стороны, медные холодильники с залитыми стальными трубами могут быть свободно адаптированы к существующим каналам охлаждения (Рис. 11).

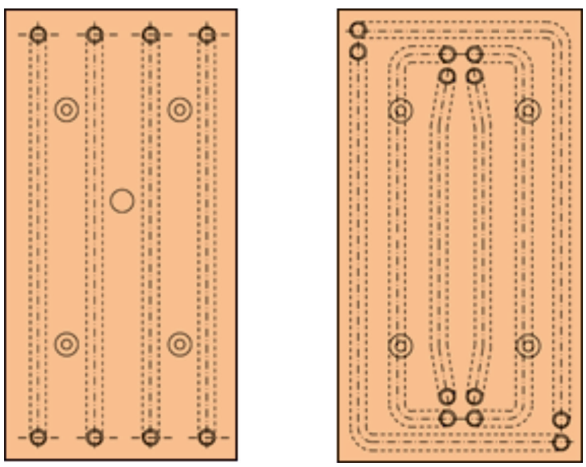


Рис. 11. Высокая свобода расположения каналов охлаждения

4.2. Снижения расхода кокса

Из-за направленных верх ребер образуется гарнисаж, который не только контролирует износ холодильника, но и сокращает отвод тепла в печи.

На рис.12 показано сравнение температуры медных холодильников со сверленными каналами и медных холодильников с залитыми стальными трубами.

При сравнении данных подтверждается, что перепад температуры на медных холодильниках с залитыми стальными трубами ниже, чем на холодильниках со сверленными каналами.

Согласно расчетам отвода тепла основанным на температуре охлаждающей воды на входе и на выходе, отвод тепла был снижен приблизительно с 0.04 МВт/м^2 до 0.02 МВт/м^2 по сравнению с медными холодильниками со сверленными каналами.

Снижение отвода тепла в печи уменьшает расход кокса. В случае доменной печи с объемом 5000 м^3 экономия расхода кокса составила 14 000 тонн/год.

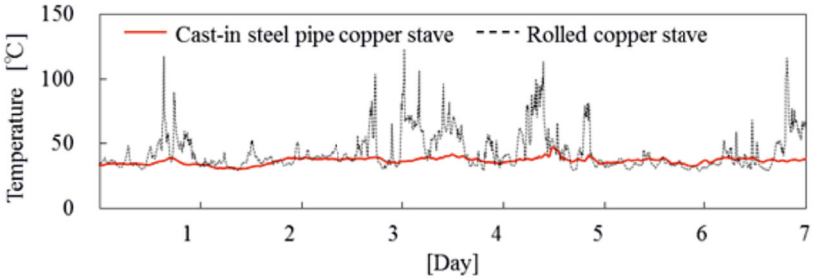


Рис. 12. Данные по температуре медных холодильников

5. ФАКТИЧЕСКИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

Медные холодильники с залитыми трубами уже используются на действующих доменных печах, и показали стабильную работу печи. На ДП № 2 завода Raahe SSAB в Европе (ранее Раутарукки) в зоне заплечиков и до нижней шахты были установлены такие холодильники (Рис. 13).

Максимальный износ медных холодильников на этом заводе составил 0.3 мм/год, что показывает возможность эксплуатации в течение 20 лет и более.

Как было отмечено в данной статье ранее, износ медных холодильников происходит из-за усилия контакта и скорости падения шихты на поверхность холодильника. Данные факторы могут варьироваться в зависимости от профиля печи и формы самого холодильника.

В случаях установки холодильников NSENGI на новых доменных печах с оптимальным профилем и формой поверхности холодильника, их срок службы составил 20 лет.

При повышенном износе холодильников на существующих печах, вызванном несоответствующим профилем печи или же высокой производительностью, переход на холодильники NSENGI удлиняет срок службы холодильников в 4–6 раз, что составляет 20 лет по сравнению со сроком службы 5–6 лет традиционных холодильников.

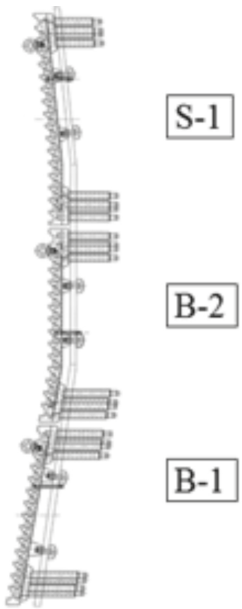


Рис. 13. Медные холодильники с залитыми стальными трубами на ДП-2 завода Raahe

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Традиционные медные холодильники имеют большой риск появления проблем, таких как поломки сварных частей и их износ. Для решения данных проблем, NSENGI разработала медные холодильники с залитыми стальными трубами со следующими характеристиками:

- Конструкция без сварных частей помогает избежать их поломок.
- Направленные вверх ребра снижают усилие контакта и скорость падения шихты, снижая износ холодильника, а также увеличивают срок службы даже при неправильном профиле печи или же при высокой производительности.

Внедрение холодильников NSENGI удлиняет их срок службы и обеспечивает стабильную работу доменной печи. Данная технология увеличения срока службы была проверена и подтверждена на действующих доменных печах.

Кроме этого, холодильники с залитыми трубами имеют следующие особенности, которых нет на традиционных медных холодильниках.

- Высокая степень свободы при проектировании холодильника дает возможность установки их в любом месте взамен чугунных.
- Направленные вверх ребра образуют гарнисаж, снижающий теплоотдачу и расход кокса. На доменной печи объемом 5000 м^3 экономия расхода кокса составила 14 000 тон/год.

Л.А. Вайсберг, А.Н. Коровников, В.А. Трофимов,
ЗАО НПК «Механобр-техника»

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМ ШИХТОПОДАЧИ ДОМЕННЫХ ЦЕХОВ

Шихта, поступающая в доменную печь, обычно состоит из 5–8 компонентов, качество которых оказывает существенное влияние на технико-экономические показатели доменного процесса. Основными показателями при этом являются: суточная производительность доменной печи в тоннах и расход кокса на 1 тонну чугуна. Содержание фракции 0–6 мм в шихтовых материалах, подаваемых в домну, не должно превышать 4%. Неудовлетворительный состав материалов приводит к резкому ухудшению технико-экономических показателей работы печи. Поэтому на шихтоподаче доменного цеха при грохочении удаляют некондиционную по крупности мелочь из шихтовых материалов, что требует применение машин с высокой эффективностью грохочения. Известно, что увеличение эффективности грохочения шихтовых материалов на 1% позволяет снизить расход топлива в доменном процессе на 0,8–1,0%.

В связи с этим на НПК «Механобр-техника» по техническому заданию Магнитогорского Гипромеза для замены грохотов устаревшей конструкции разработан инерционной грохот тяжелого типа ГИТ-51ДК. Общий вид нового грохота показан на рис. 1.

Грохоты разработаны на производительность не менее 200 м^3/ч с целью вывода из технологического процесса мелкой фракции — 6 мм и повышения за счет этого производительности доменных печей.

Особое внимание обращалось на повышение эффективности грохочения шихты, что обеспечивает повышение производительности доменных печей и снижение расхода топлива в доменном процессе.

Грохоты ГИТ-51ДК разработаны с учетом их установки на существующие строительные конструкции доменных цехов и привязки в действующем производстве. Необходимо было учесть, что строи-

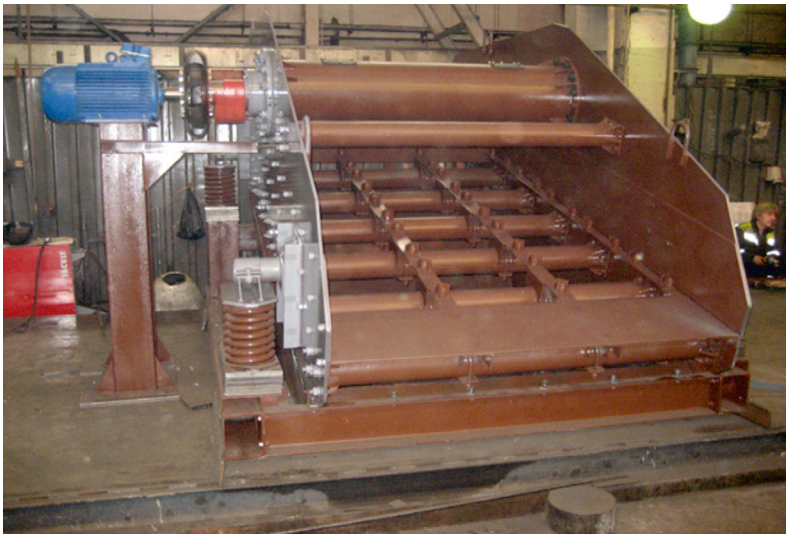


Рис. 1. Общий вид грохота ГИТ-51ДК для узлов шихтоподачи доменных цехов

тельные конструкции узлов шихтоподачи каждой из доменных печей имеют определенные отличия. В результате было спроектировано несколько исполнений грохота, основное — с соосным расположением привода с вибровозбудителем и еще одно — с установкой привода под приемной воронкой подрешетного продукта грохота с передачей вращающего момента на вал вибровозбудителя через клиноременную передачу. В грохоте использован вибровозбудитель блочной конструкции, состоящей из двух виброблоков, соединенных между собой промежуточным валом. Вибровозбудитель помещен в корпус, который крепится к бортовинам грохота фланцевым креплением. Конструктивное решение расположения вибровозбудителя позволило создать неоднородное поле колебаний: эллиптические траектории колебаний короба грохота, способствующие ускорению движения материала в зоне загрузки и замедлению в зоне разгрузки. В качестве просеивающей поверхности применены металлические перфорированные сита с продолговатыми отверстиями размером 6,5×40 мм, расположенными в виде «ёлочки»; они изготавливались из специальной износостойкой стали марки ASH 80 (совместная разработка «Механобр-техники» с немецкими партнерами — фирмой «Steinhaus»). Площадь просеивающей поверхности грохота ГИТ-51ДК почти в 3 раза превышает площадь просеивающей поверхности ранее эксплуатируемого грохота.

Грохот ГИТ-51ДК устанавливается на откатную раму, имеющую воронку для сбора подрешетного материала.

Техническая характеристика грохота ГИТ-51ДК приведена в таблице 1.

Таблица 1. Техническая характеристика грохота ГИТ-51ДК

Производительность , м^3/ч	не менее 200
Крупность исходного материала, мм	0–50
Крупность разделения , мм	6
Размеры просеивающей поверхности, мм	
длина	1650
ширина	2500
Количество просеивающих поверхностей, шт	1
Угол наклона просеивающей поверхности, град	15
Амплитуда колебаний, мм	3…4.5
Частота колебаний, Гц	16

Продолжение таблицы

Мощность привода, кВт		не более 15
Габаритные размеры, мм		
	длина	3850
	ширина	3110
	высота	2045
Масса грохота, кг		4750

Впервые новые грохоты были применены в доменном цехе Магнитогорского металлургического комбината (ММК), в первом из трех основных звеньев производственного цикла предприятия (два последующих — передел чугуна в сталь и прокатка).

Производство чугуна является наиболее энергоемким, высокозатратным звеном со значительной долей (до 70%) экономических затрат в получении готовой конечной продукции предприятия.

Панорама доменного цеха показана на рис. 2.

Рис. 2. Панорама доменного цеха

Доменное производство ММК включает восемь доменных печей: №№ 1, 2, 4, 7, 8 — с полезным объемом по 1371 м^3 каждая; № 6 — 1380 м^3 (в 2013 г. начата реконструкция печи с увеличением мощности); №№ 9 и 10 — по 2014 м^3. На рис. 3 и 4 показаны доменные печи № 1 и № 9 соответственно.

У компании есть собственная железорудная база, что частично (только на 10%) обеспечивает потребности в сырье; в 2013 году, например, горно-обогатительное производство ММК добыло 1625 тыс. тонн товарной железной руды.

Кроме того, есть собственное агломерационное и коксохимическое производство. Так, в состав агломерационного цеха входят 3 аглофабрики:

- аглофабрика №2 в составе 5 агломашин с площадью спекания по 75 м^2 каждая;
- аглофабрики № 3 и № 4 в составе каждой имеется по 4 агломашины примерно той же площади.

Производительность агломерационного цеха по выпуску агломерата составляет 11,5 млн т в год. Коксохимическое производство – это 9 коксовых батарей (количество действующих печей — 573) суммарной мощностью 5,82 млн т в год.

Рис. 3. Доменный цех ММК. Печь № 1

Рис. 4. Доменный цех ММК. Печь № 9

В целом НПК «Механобр-техника» поставила на Магнитогорский металлургический комбинат 76 грохотов ГИТ-51ДК, которые эксплуатируются в узлах шихтоподачи пяти доменных печей. На рис. 5 показана установка этих грохотов на доменной печи № 4.

Применение новых грохотов позволило повысить производительность доменных печей ММК ориентировочно на 15%.

Технологические опробования в узлах шихтоподачи показали, что грохоты обеспечивают эффективность грохочения по классу 6 мм не ниже 70% при производительности до 700 т/ч, что в 2 раза превышает значение производительности по техническому заданию Магнитогорского Гипромеза. Срок службы металлических сит на грохотах ГИТ-51ДК составляет не менее 13 месяцев, вместо заявленных в этом же задании 6 месяцев.

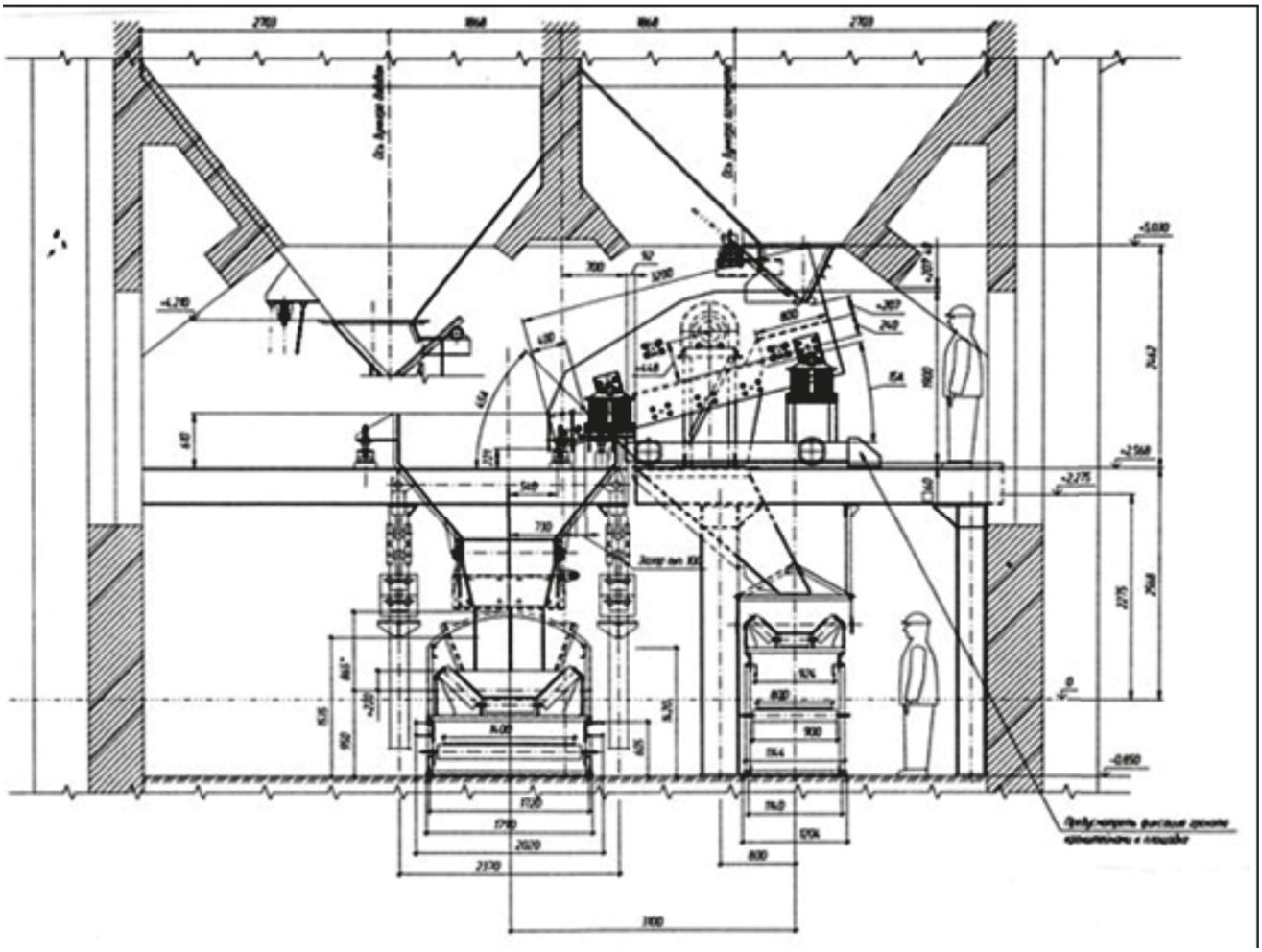


Рис. 5. Установка грохотов ГИТ-51ДК на доменной печи № 4

Как отмечено специалистами Магнитогорского металлургического комбината, грохоты ГИТ-51ДК полностью соответствуют требованиям, предъявленным к данному виду оборудования, и обеспечивают достижение необходимых технико-экономических показателей доменного производства; они механически надежны.

Юй Гохуа, Чжан Сянго, Ван бин, «Ansteel Group Corporation»

ИННОВАЦИЯ И ПРАКТИКА ПРОЕКТИРОВАНИИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ № 3 ОБЪЕМОМ 3200 м^3 ПАО «ЛАЙУСКАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ КОРПОРАЦИЯ»

1. ВВЕДЕНИЕ

ПАО «Лайуская металлургическая корпорация» была основана в январе 1970 г. В настоящее время на главном заводе в наличии имеются доменные печи объемом 750 м^3 — 3 шт., объемом 1080 м^3 — 3 шт., объемом 1880 м^3 — 2 шт. и объемом 3200 м^3 — 1 шт. Общий объем составляет 12450 м^3. Годовая производительность жидкого чугуна —12000 тыс. тн. Доменная печь № 3 объемом 3200 м^3 была введена в эксплуатацию в марте 2010 г. По состоянию на сегодня эксплуатация стабильная, по производственным показателям числится в передовых по стране.

Общий вид I цеха доменной печи № 3 ПАО «Лайуская металлургическая корпорация»

2. РУКОВОДЯЩИЕ ИДЕИ И ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В проектировании доменной печи № 3 объемом 3200 м³ ТОО компании «Иньшань» при ПАО «Лайуская металлургическая корпорация» была принята основная цель при строительстве это «модернизация технологии, компактное размещение крупногабаритного оборудования, интенсификация производства, максимальное использование энергетических ресурсов, автоматизация технологических операции, информатизация управления процессов, оптимизация экономической эффективности и санации окружающей среды». Руководящая идея при проектирование, это «высокая эффективность, низкие удельные затраты, высокое качество, долгий срок службы и чистота».

Общий вид II цеха доменной печи № 3 ТОО «Лайуская металлургическая корпорация»

3. ГЛАВНЫЕ ПРОЕКТНЫЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

В соответствии с фактическим состоянием производства и поставки сырья и топлива, с учетом фактических показателей производства отечественных и зарубежных доменных печей одинакового уровня установлены главные проектные технико-экономические показатели доменной печи № 3 объемом 3200 м³ ПАО «Лайуская металлургическая корпорация», которые преведены в табл. 1.

Таблица 1. Главные проектные технико-экономические показатели доменной печи

Объект	Проектный показатель	Примечание
Эффективный объем доменной печи	3200	
Средний коэффициент использования, т/м³·д	2.5	Способность : 3.0
Средняя производительность железа, т/д	8000	Max : 9600
Удельный расход топлива, кг/т	510	
Удельный расход кокса, кг/т	310	
Удельный расход угля, кг/т	200	Max : 250
Температура дутья, °С	1250	Max : 1300
Среднее кол-во дутья в печь, м³/мин	7000	Max : 8000
Процент обогащения кислородом, %	3	Способность : 5
Пропорция шлака, кг/т	≤300	
Давление на колошнике, МПа	0.25	Max : 0.3
Температура на колошнике, °С	≤250	
Количество получаемого газа, м³/ч	560000	Max : 650000

Продолжение табл. 1

Объект	Проектный показатель	Примечание
Доля окускованной шихты ,%	100	
Комплексное содержание Fe в печь, %	59.25	
Годовая производительность чугуна, 10^4 т/г	280	
Срок службы доменной печи, г.	15	Отсутствие среднего ремонта

Общий вид II цеха доменной печи № 3 ПАО «Лайуская металлургическая корпорация»

4. ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ПРОЕКТЕ ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

4.1. Технология по обработке высококачественных материалов для доменной печи

Высококачественный материал представляет собой основу и объектное требование к благополучной эксплуатации, передовым показателям, экономии и низкой затраты. В проекте применилась рациональная структура шихты: агломерат 75%, окатыши 25, комплексное содержание Fe в печь составляет 59.25%.

Склад руд и пылеудаление доменной печи № 3

Для каждого бункера руд и коксов под складом установились вертикальный консольный вибрирующий грохот экологического типа, вибрационный питатель и ручной ремонтный затвор, применились технологии по дисперсному грохочению, взвешиванию, непосредственной подачи материалов подающим конвейером без централизованной станции взвешивания, кроме того, установилась для всех шихт система автоматической компенсации отклонения взвешивания, а также система автоматического измерения и компенсации влаги и веса для коксов.

В проектировании использовалась технология по утилизации коксовых орешков, с которой можно утилизировать коксовые орешки размером 10–25 мм, после взвешивания эти коксовые орешки были поданы в печь совместно с рудами.

4.2. Технология по распределению шихты с бесконусном колошником

В проектировании колошника доменной печи № 3 используется бесконусное загрузочного устройство с двумя последовательно соединёнными бункерами PW. Газоплотность осуществляется по способу герметизации водяного охлаждения и азотной герметизации, на клапанах применено пропаривание. Эффективный объем бункера составляет 80 м^3, длина распределенного лотка доменной печи — 4.5 м. Кроме того, шестеренная коробка передачи шлюза применила замкнутое циркуляционное охлаждение, объем оборотной воды м^3/ч.

Бесконусный колошник с двумя последовательно соединенными бункерами доменной печи № 3

4.3. Комплексная технология по продлению срока службы доменной печи

1. Проект профиля доменной печи

Проектирование профиля доменной печи № 3 было основано на накоплении опытов и данных операции ПАО «Лайуская металлургическая корпорация», в соответствии с условиями сырья и топлива, с учетом передовых по производственным показателям профилей отечественных и зарубежных доменной печи при условии аналогии в объеме, состоянии сырья, топлива и условии операции, причем было установлено расчетом по эмпирической формуле [1].

Для доменной печи № 3 использовался низкий и толстый профиль, который пригоден для форсирования плавки, в частности, рассмотрели следующие пункты: рациональное повышение глубины мёртвого слоя для увеличения высоты всплывания кокса и открытия проход шихтового столба в нижней части печи. Таким образом, можно уменьшать размывание жидким чугуном огнеупорных материалов при его циркуляции. Соответственно увеличение высоты горна и диаметра распара, уменьшение угла заплечиков [2]. Главные параметры профиля доменной печи объемом 3200 м^3 приведены в табл. 2.

Таблица 2. Главные параметры профиля доменной печи объемом 3200 м^3

Объект	Доменная печь 3#	Объект	Доменная печь 3#
Эффективный объем	3200	Высота заплечиков/м	4.3
Диаметр горна/м	13.3	Высота распара/м	2.0
Диаметр распара/м	15.0	Высота шахты/м	17.8
Диаметр колошника/м	9.4	Высота колошника/м	2.0
Высота доменной печи/м	31.1	Угол заплечиков/(°)	78.818
Высота мертвого слоя/м	3.0	Угол шахты/(°)	81.061
Высота горна/м	5.0		

2. Проект структуры горна и подины

В проектировании подины доменной печи № 3 ПАО «Лайуская металлургическая корпорация» применило структуру по устилке подины четырехслойными большими углеродистыми кирпичами, а для горна — структуру комбинированной набойки горячепрессованных кирпичей UCAR с кирпичами для стенки керамического стакана. Что касается фурменной зоны применилась структура больших корундовых комбинированных кирпичей. Применено водяное охлаждение подины.

3. Холодильное оборудование корпуса печи

Для охлаждения подины доменной печи № 3 использовалась структура плитового холодильника с полным покрытием, при которой размещались в ключевых частях заплечика, распара и нижней части шахты медный плитовой холодильник с залитым кирпичем шестиступенчатой прокатки. В частности, применилась технология по объединению медного и чугуноплавильного плотового холодильника в их переходной части заплечка и фурмы [3]. В средней и верхней части шахты установился плитовой холодильник с залитым кирпичем из сфероидизированного чугуна, а в зоне чугунной летки и зоне эрозии («слоновая нога») горна — медный плитовой холодильник чистовой прокатки, для других зон горна и фурменной зоны — гладкий плитовой холодильник из жароупорного чугуна. Для колошника применилась структура одноступенчатого водяного охлаждения. Для холодильников использовалась высококачественная износостойкая легированная литая сталь.

4. Проект системы охлаждающей воды

В проекте доменной печи № 3 применена технология замкнутого циркуляционного охлаждения мягкой водой, которая характеризуется установлением плитовых холодильников для подины, среднего кожуха фурмы и корпуса печи, что образует 3 параллельные охлаждающие трубопроводы, из них оборотные воды поступают в насосную станцию мягкой воды после сбора и обезвоздушивания. Поступившая вода после вторичного охлаждения может использоваться повторно. Общий объем воды для охлаждения плитовых холодильников составляет 5300 м^3/ч.

5. Совершенная система автоматической проверки и управления

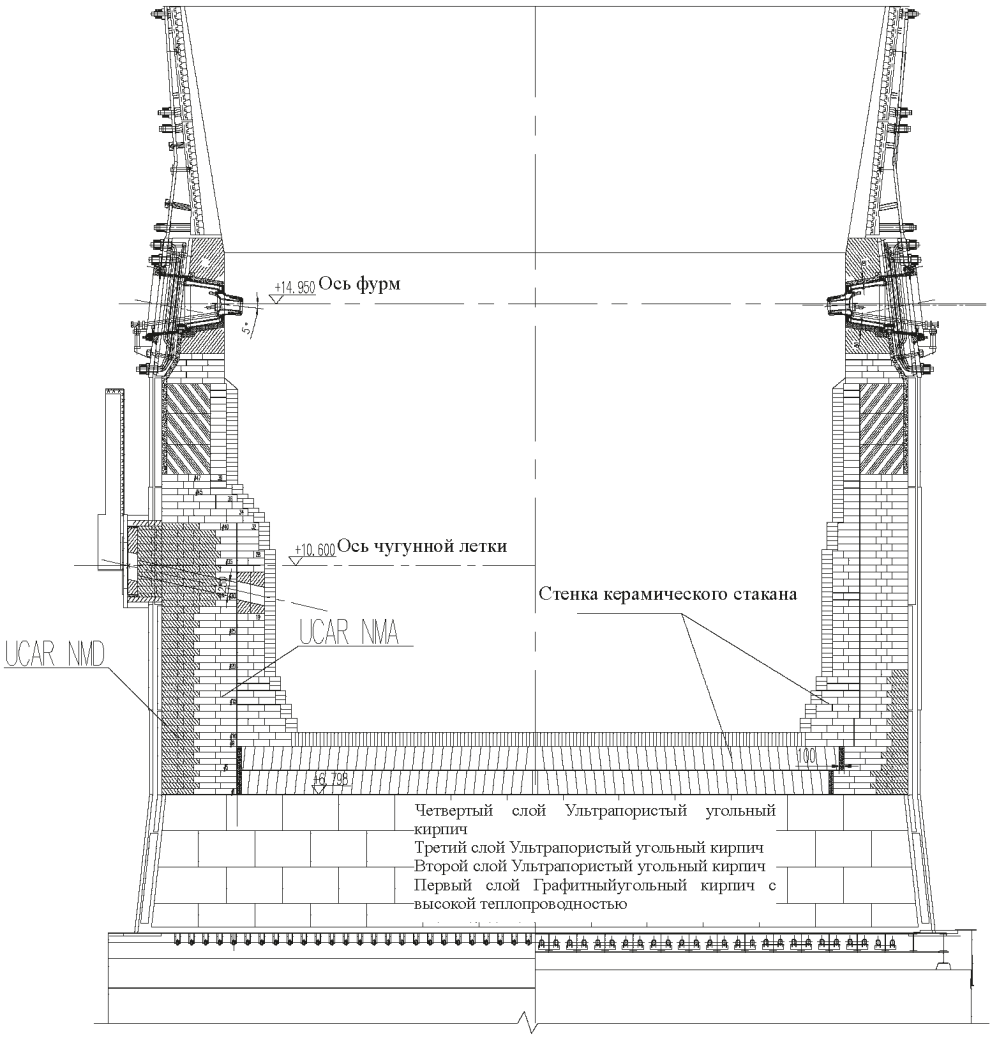
На доменной печи № 3 установлена совершенная система проверки корпуса печи, в которую входят как система проверки температуры подины и горна, установка для проверки термоэлемент плитового холодильника и статического давления корпуса печи, а также система проверки температуры, давления, расхода и уровня воды для системы охлаждающей воды. Кроме того, установлена инфракрасная камера на колошнике, камера на фурме и другое контрольное и измерительное оборудования.

4.4. Технология по выравниванию и механизации литейного двора

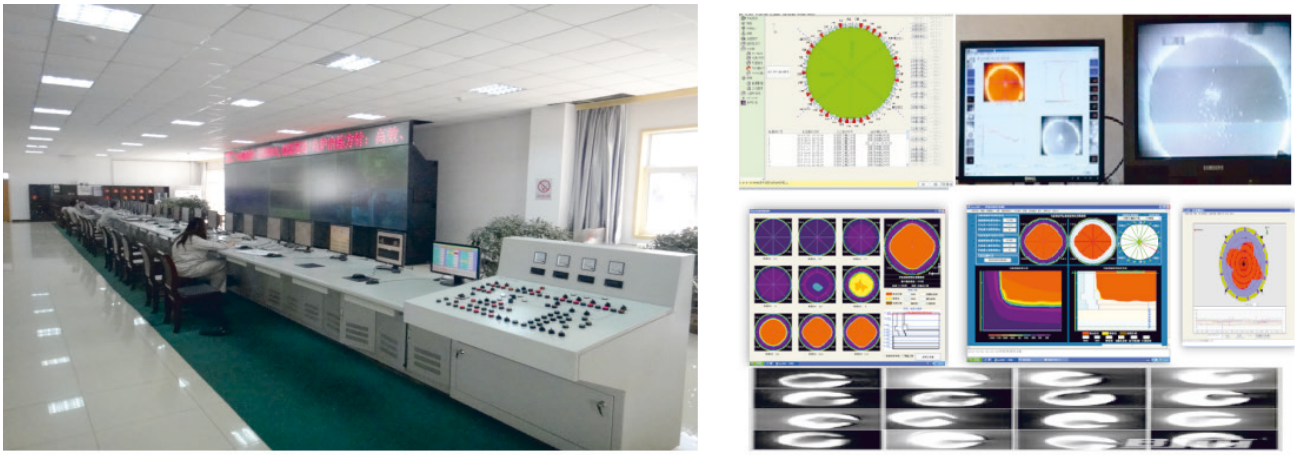
Для доменной печи № 3 имеется два литейных двора прямоугольной формы. На каждом дворе установилось 2 чугунной летки, укомплектованной независимой гидравлической пушкой, машиной для пробивания летки, машиной для передвижения крыши, качающимся лотоком и другим оборудованием. Литейный двор применил платформу железобетонной конструкции без заполнения песком, которая была выравнена полностью. Причем для удобства ремонта и замены фурменных приборов установилася на восточной части двора полоса движения до платформы. Под каждым литейным двором размещались 4 постановочные пути чугуновоза, на коротых использовались чугунные ковши объемом 140 тонн для перевозки и получения жидкого чугуна. Укомплектовали каждый литейный двор низковольтным импульсным пылеочистителем длинного мешочного типа с производительностью 946000 м^3/ч.

4.5. Усовершенствованный воздухонагреватель с верхней камерой горения

В 2002 г. ПАО «Лайуская металлургическая корпорация» впервые в проекте доменной печи № 3 объемом 750 м^3 применился воздухонагреватель высокой температуры дутья с верхней камерой горения, который получил положительный результат, после этого данная технология была широко использована в Китайских металлургических предприятиях.

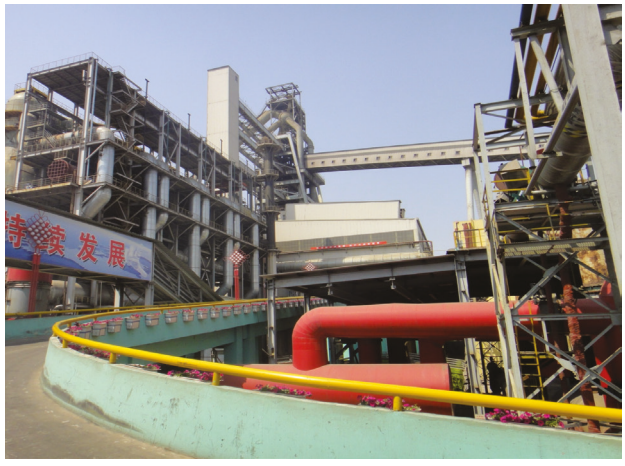


Структурная схема горна и подины доменной печи 3#



Корпус главного управления и совершенная система проверки и управления доменной печи № 3

Литейный двор доменной печи № 3



Эстакада и подход платформы фурм доменной печи № 3

Технология по усовершенствованному воздухонагревателю с верхней камерой горения является запатентованной техникой нашего института, которая основана на усовершение горелки и структуры жесткой подины воздухонагревателя KALUGIN. Для усовершенствованного воздухонагревателя с верхней камерой горения установилась теплоизоляция на горелке, причем по существу решился вопрос отогнутой вверх подины путем применения комбинированной жесткой и гибкой структуры. Регулировали систему трубопроводов воздухонагревателя и их опоры, что позволяет оптимизация и стабилизация системы трубопроводов.

В проектировании доменной печи № 3 ПАО «Лайуская металлургическая корпорация» использовало 4 усовершенствованные воздухонагревателя с верхней камерой горения, применило доменные газы низкой теплотворностью, обеспыленные сухим методом с перемешиванием с коксовыми газами, проектная температура дутья при таком случае составляет 1300°, а также систему одновременного предварительного нагревания воздуха и газа и систему утилизации отбросного тепла.

4.6. Высокоэффективная технология по очистке от пыли сырым газом

С применением технологии высокоэффективного осевого циклонного пылеуловителя для системы сырого газа эффективность пылеотделения доменной печи № 3 достигла 85–90%. Кроме того, использовалась технология «пятиходовой шар» для верхней части газоотвода колошника, что позволило снизить высоту колошника примерно 11 м.

4 усовершенствованные воздухонагревателя с верхней камерой горения доменной печи № 3

Циклонный пылеуловитель типа PW доменной печи № 3

4.7. Экологическая технология обработки шлаков методом INBA

Для осуществления чистого производства и снижения воздействия на окружающую среду ПАО «Лайуская металлургическая корпорация» использовало в проекте доменной печи № 3 2 комплекта оборудования с охладителем выпара для осуществления технологии обработки шлаков методом INBA. Данная технология не только решила вопрос по загрязнению окружающей среды из-за выпуска вредных паров в большом объеме в процессе отработки шлака, но и улучшила условии для охраны окружающей среды.

4.8. Технология по сухому пылеудалению для доменного газа с использованием пылеочистителя мешочного типа

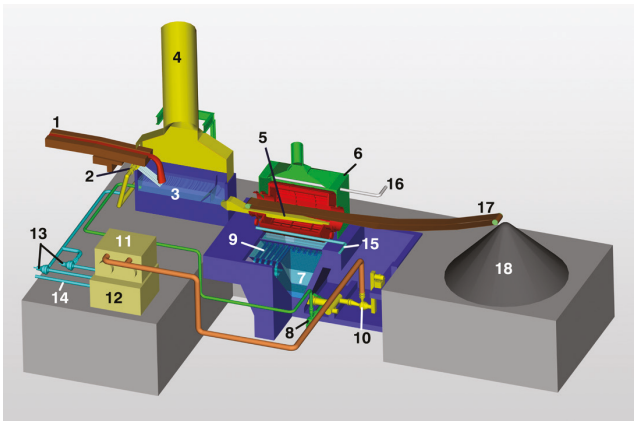
Максимальный объем обработки доменного газа в проекте при использовании пылеочистителя мешочного типа составляет 650000 Nм^3/ч. Данная система включает в себя 18 коробок, диаметр корпуса коробки составляет 5200 мм, площадь фильтрации одиночной коробки — 1138 м^2, материал фильтровального мешка-сверхтонкий FMS 9806. Содержание пыли в очищенном пылеочистителем мешочного типа газе снижается до менее 5 мг/м^3.

4.9. Технология по приготовлению и вдуванию измельченного угля

Главное помещение вдувания измельченного угля в доменную печь № 3 было спроектировано в соответствии с совместным вдуванием каменного угля и бездымного. Проектный удельный расход угля составляет 200 кг/т, максимальное 250 кг/т. Использована технология среднеходной мельницы + улавливание и приготовления измельченного угля одноступенчатыми мешками, манифольда + перекачка измельченного угля распределителем в плотной фазе. Использовались в проекте 2 среднеходных мельницы с производительностью измельченного угля 58 т/ч. Система вдувания с последовательным расположением резервуаров, укомплектовали 2 распределителями доменной печи № 3 сериями вдувания (2 в эксплуатацию, 1 в запас). Перекачка измельченного угля применила сжатый воздух.

5. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРАКТИКА

Зажигание и запуск доменной печи № 3 объемом 3200 м^3 были проведены в 16.03.2010 г. Через 4 дня печь достигла показателей производства, по состоянию на сегодня эксплуатация ее стабильная, по производственным показателям предприятие числится в передовых в стране. Текущие показатели производства доменной печи составляют: коэффициент использования 2.5 т/(м^{3}сут), температура дутья 1200°, удельный расход кокса 340 кг/т, удельный расход угля 170 кг/т, давление на колошнике 225 кПа, процент обогащения кислородом — 3%, комплексное содержание Fe в печь 56.3%.



Обработки шлаков методом INBA доменной печи 3#

Пылеочиститель мешочного типа для газа доменной печи № 3

Вдувание измельченного угля доменной печи 3#

После ввода в эксплуатацию доменной печи № 3 ПАО «Лайуская металлургическая корпорация» совместно с Пекинским университетом науки и технологии исследовали закономерность изменения температуры керна [4] доменной печи путем следования системы проверки температуры горна, по комплексному анализу и расчету они предполагали, что мертвый шихтовый столб данной печи находится в состоянии «всплывание». Данное заключение доказало, что глубина мертвого слоя печи является рациональным.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проектировании доменной печи № 3 применился ряд отечественных и зарубежных передовых инновационных технологий. После ввода в эксплуатацию ПАО «Лайуская металлургическая корпорация» предприятие было числено по технологическим и экономическим показателям в передовых как в стране, так и за рубежом. Практика доказала, что применяемая ПАО «Лайуская металлургическая корпорация» новая технология соответствует требованиям экономии энергии и экологии в металлургической промышленности, причем показала его беспрерывный прогресс в проектировании и производственной практике доменной печи.

7. Список литературы

[1] Сян Чжунюн Проектирование доменной печи — теория и практика технологического проектирования выплавки чугуна. Пекин: Издательство литературы по металлургической промышленности, 2007. 11, P. 323.

[2] Чжан Фу мин Современная технология по продлению срока службы доменной печи. Пекин: Издательство литературы по металлургической промышленности, 2012. 9. P. 479.

[3] Юй Го хуа, Ван бин, Чэньчэн. Проект по продлению срока службы корпуса доменной печи № 3 ПАО «Лайуская металлургическая корпорация». [J] журнал «Энергия для металлургической промышленности» 2014, 33(2): 14–17

[4] Чэн Шу сэнь, Лю Юань и, Цзян Сюецзянь. Обсуждение о закономерности изменения температуры керна доменной печи объемом 3200 м^3. ПАО «Лайуская металлургическая корпорация». [J] журнал «Выплавка чугуна»

А.П. Уланов, ООО «ВНИПИ САУ-20», В.М. Паршаков, ООО «АКОММ», А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ В СНГ АСУ ТП ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОДЕРЖАНИЯ... 282

В.В. Кочура, С.Л. Ярошевский, В.И. Купенко, ДонНТУ
КОНТРОЛЬ СТЕПЕНИ СГОРАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПО АНАЛИЗУ ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ 294

А.А. Третяк, ООО «ТАЛС-1», В.М. Паршаков, В.А. Борисенко, ООО «АКОММ», М.В. Чемикосов, ООО «Аэротранс», А.П. Уланов, ООО «ВНИПИ САУ-20»
ДОСТОВЕРНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ГАЗОВОГО ПОТОКА ПО РАДИУСУ КОЛОШНИКА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ, ПОЛУЧАЕМОЙ РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ ИЗМЕРЕНИЙ..... 302

В.М. Паршаков, ООО «АКОММ», А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
А.А. Полинов, А.В. Павлов, И.Е. Прохоров, А.В. Колосов, П.Ю. Довженко, ОАО «ММК»
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ЗА СЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЫШЕНИЯ АСУ ТП ДОМЕННОЙ ПЕЧИ (НА ПРИМЕРЕ ВНЕДРЕНИЯ НА ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ ОАО «ММК») 309

В.М. Паршаков, ООО «АКОММ», А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
А.А. Полинов, А.В. Павлов, И.Е. Прохоров, А.В. Колосов, П.Ю. Довженко, ОАО «ММК»
НЕПРЕРЫВНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ, КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДВУМЕРНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ПРОЦЕССЫ ПО ВЫСОТЕ И СЕЧЕНИЮ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ОТ УРОВНЯ ЗАСЫПИ ДО ЧУГУННОЙ ЛЁТКИ 328

Дитер Беттингер, «Primetals Technologies»
КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ АГЛОДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА..... 342

С.А. Денисов, ООО «КОНВЕЛС Автоматизация»
СИСТЕМА ELMAN ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЕМ ПОДАЧ И РЕЖИМОМ ДУТЬЯ ПУТ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ХОДА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПОТОЧНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА 350

Раздел V
АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

П.П. Богданов, ООО «Конвелс Автоматизация»
БЕСКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА КОНТУРОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ПАССИВНОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ 356

Б.А. Марсуверский, ООО «НПО Санкт-Петербургская Электротехническая Компания»
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ НА ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ АСУ ПО ИНФОРМАЦИИ ОБ АКТИВНОМ ВЕСЕ ШИХТЫ 363

Н.Г. Иванча, И.Г. Муравьева, А.С. Нестеров, Ю.С. Семенов, Е.И. Шумельчик, ИЧМ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ, РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКОЙ 366

А.И.Лаврухин, Л.Д.Хинский, ОАО «Облпромавтоматика»
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ЛОТКА БЗУ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ УРОВНЯ ЗАСЫПИ ШИХТЫ НА КОЛОШНИКЕ ДП № 5 ЧЕРЕПОВЕЦКОГО МЕТКОМБИНАТА ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ» 377

А.В. Липатников, Д.А. Шнайдер, А.А. Полинов, А.В. Колосов, Е.Н. Степанов, М.А. Цыгалов, А.Е. Степанова, Е.В. Астратова, ОАО «ММК»
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИВОЗА И ПОТРЕБЛЕНИЯ УГОЛЬНОГО И ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ В АГЛО-КОКСО-ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВАХ ОАО «ММК» НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 381

Д.А. Шнайдер, А.А. Полинов, А.В. Колосов, А.В. Павлов, И.Е. Прохоров, ОАО «ММК»
Казаринов Л.С., Барбасова Т.А., Колесникова О.В., Басалаев А.А., ЮУрГУ
МОДЕЛЬНО-УПРЕЖДАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ СОСТОЯНИЕМ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ НА ОСНОВЕ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ЭФФЕКТИВНОЙ МНОГОМЕРНОЙ ОБЛАСТИ 392

А.П. Уланов, ООО « ВНИПИ САУ-20»,
В.М. Паршаков, ООО «АКОММ»
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ АСУ ТП ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОДЕРЖАНИЯ

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) доменной печи создаются для совершенствования управления плавкой с целью повышения её экономичности. В течение более полувека развитие их сначала в СССР и сейчас в СНГ шло в двух основных взаимосвязанных направлениях:

- развитие средств (датчиков, микропроцессорной и вычислительной техники) и систем автоматизации, специального программного обеспечения для сбора, обработки и представления информации о работе печи. Это получило название нижний уровень АСУ ТП (базовая автоматизация);
- развитие математического описания доменного процесса для контроля, анализа, оптимизации и прогноза доменной плавки, прикладного программного обеспечения для функционирования разработанного математического обеспечения. Это получило название верхний уровень АСУ ТП (математическое моделирование).

Рассмотрим развитие каждого из этих направлений.

1. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

С 1959 по 1968 г. ВНИИМТ совместно с НТМК проводил работу по созданию первой в СССР АСУ ТП ДП-2 НТМК [1, 2]. Основанием для работы было постановление Совета министров СССР № 614 от 1958 г. о комплексной автоматизации. В составе ВУ создаваемой системы

предусматривалось решение ряда технологических задач с применением ММ доменной плавки, разработанных во ВНИИМТ [3–7]. Использованные технические средства (вычислительная машина «Урал-2» с 1600-ми электронными лампами, кустарные устройства связи с объектом и т.д.) не дали возможности завершить начатую работу, но она явилась толчком к разработке необходимых датчиков контроля доменной плавки, к продолжению разработки математического описания доменного процесса и т.д.

Следующим важным этапом создания АСУ ТП доменной печи была разработка АСУ ТП крупнейшей на то время доменной печи № 9 Криворожстали, эксплуатация которой началась с 1974 года. Разработка велась под контролем соответствующих министерств союзного уровня.

В качестве временных вех в советском периоде развития автоматизации можно назвать внедрение АСУ ТП на новых доменных печах № 6 Новолипецкого меткомбината (1978 год) и № 5 меткомбината «Северсталь» (1986 год).

Окончательной отметкой стало тиражирование проверенных проектных решений в АСУ ТП доменных печей метзавода в г. Визакхапатнам, Индия (1990–1992 гг.). Головной организацией по автоматизации всех этих советских и индийских печей с конвейерной подачей шихты на колошник было ЦПКБ «Союзпромавтоматика», позднее переименованное во ВНИПИ САУ (г. Москва) с филиалами в Днепропетровске и Липецке.

Система государственного управления промышленностью определяла круг специализированных организаций для решения какой-либо проблемы, в том числе назначала головную организацию по автоматизации важного конкретного объекта, в частности, доменной печи. В то время предполагалось применение средств автоматизации исключительно советского производства, которые зачастую доводились до нужной кондиции непосредственно во время внедрения и эксплуатации.

В среде разработчиков существовала преемственность поколений с взаимным обменом опытом и владением новой техники. В каждой организации по автоматизации имелись специалисты, владеющие знаниями, охватывающими практически все, что надо знать и уметь «системному» разработчику АСУ ТП доменной печи. В первую очередь, это — технология доменного передела и объектов комплекса доменной печи, технологическое оборудование и механизмы, способность поставить задачу и реализовать ее, способность понимания проблем и путей их решения и многое другое. Этих специалистов было немного, но их было достаточно для формирования линейного руководства разработками. В то время результаты опубликованных работ, как положительных, так и отрицательных являлись народным достоянием и были доступны любому специалисту, а для разработчика они являлись обратной связью.

За последние 25 лет практически повсеместно произошел провал в подготовке специалистов по автоматизации доменного процесса. Ряд известных организаций рассыпались на более мелкие, многие из них потеряли основные здания, которые новые собственники предпочитали сдавать в аренду.

С 1995 года началось развитие автоматизации доменных печей, при этом практически прекратилось применение отечественной микропроцессорной, вычислительной и коммуникационной техники, а к 2005 году дело дошло и до использования импортных датчиков массового применения и исполнительных механизмов. Известные приборостроительные зарубежные фирмы вкладывают большие деньги в развитие своей технической и программной продукции, используют труд тысяч высококвалифицированных специалистов, что недоступно многим отечественным производителям. В последнее время из применяемого отечественного оборудования используются, в основном, термопары и термосопротивления, ряд специализированных датчиков. Даже многие электротехнические изделия (реле, автоматы, клеммники и пр.) производятся за пределами России или на совместных предприятиях.

Рынок проектирования доменных печей вообще, а АСУ ТП в частности, весьма мал, что проблемно как для генпроектировщиков, так и для специализированных организаций в отношении непрерывности разработок. Кроме того, на этом рынке появились разработчики, берущиеся за разработку АСУТП домны, как за любой другой объект.

Ряд европейских зарубежных фирм создали свои дочерние предприятия для освоения российского и украинского рынка, которые сделали ряд работ весьма некачественно, т.к. требуемые специалисты подходящего для зарубежных работодателей возраста, но с солидным опытом конкретной работы, отсутствуют.

Смена собственника привела к появлению ноу-хау, коммерческой и технологической тайны, служб информационной безопасности и ограничения доступа к результатам выполненных работ. В итоге эксплуатационные службы стали «хранителями» технологии приемов проектирования специализированных организаций, кое-где сами начали разрабатывать системы, если позволяют условия эксплуатации и имеется финансовая поддержка и специалисты с квалификацией повыше эксплуатационника, а также решены вопросы легализации таких разработок. При отсутствии выхода на объекты других предприятий такая деятельность, совмещенная с эксплуатацией, представляет собой «варку в собственном соку».

Выбор разработчика по тендеру вывел службу закупки на более высокий уровень принятия решений по сравнению с конкретными заводскими специалистами, а объединение разработки и поставки оборудования в одном тендере предоставляет перепродающим фирмам более выгодные условия, чем специализированным инжиниринговым фирмам.

Практика разработки и внедрения систем автоматизации на доменной печи силами хоть и превосходных программистов и электронщиков, но некомпетентных в каждом конкретном случае, может привести к непредсказуемым последствиям. Особенно массу нареканий у эксплуатации вызывают конструкция закладных деталей для установки датчиков, предлагаемых разработчиками, не имеющими никакого опыта их внедрения на разных объектах. В практике автоматизации доменного производства имеются примеры применения полупроводниковых датчиков температуры охлаждающей воды, которые при высокой чувствительности имеют характеристики, недостаточно стабильные для выполнения требований промышленной безопасности. В качестве недостаточной компетенции разработчиков можно привести неоднократные примеры применения электромагнитных реле, имеющих ограниченный ресурс для управления исполнительными механизмами постоянной скорости в контурах непрерывного автоматического регулирования параметров газодинамики или установки электромагнитных расходомеров в вертикальном положении на сливе воды с «разрывом струи».

Что произошло в составе задач автоматизации доменного процесса за эти годы? Не будем конкретно рассматривать стандартные технические и программные средства, коренным образом изменившие условия контроля, отображения, регистрации, архивирования и управления технологическими процессами вообще и доменным в частности. А именно: сразу исчезли многометровые щиты с регистраторами и дорогостоящими трудоемкими мнемосхемами, уменьшилось количество электротехнического оборудования, началось массовое применение пускорегулирующей аппаратуры в системах автоматизированного электропривода, датчиков, действие которых основано на других физических принципах, датчиков перемещения, кодированных маркеров и пр. Что же касается новых задач контроля и управления на нижнем уровне АСУ ТП, то, по большому счету, их немного.

Самые современные новости в области АСУ ТП связаны с применением технологического оборудования нового типа. Это — бесконусные загрузочные устройства, гидравлические механизмы литейных дворов для работы с закрытыми желобами, сканнеры и профилемеры, термозонды над уровнем шихты, медные холодильники, замкнутые контуры охлаждения химически очищенной водой, оборудование дросселирования колошникового газа (в т.ч. газовые турбины), газоочистки доменного газа сухого типа, инфракрасные камеры, двухкамерные воздушные фурмы, установки вдувания пылеугольного топлива и каменноугольной смолы, воздухонагреватели с горелками в куполе, радарные измерители уровня и др. Появление этого оборудования вызвало применение достаточно большого количества дополнительных средств автоматического контроля и управления. Это касается и развития систем верхнего уровня, например, современная система контроля разгара горна потребовала увеличения количества термопар, закладываемых в лещадь, с 5–7 шт. до 250–350 шт.

Система охлаждения новейшей доменной печи России (ДП-7 ОАО «НЛМК»), имеющая нестандартную для отечественной практики схему обвязки чугунных и медных холодильников, контролируется более чем 2000 датчиками расхода и температуры воды, необходимыми для решения задач контроля прогара фурм и холодильников и определения удельного теплосъема. В связи с возросшими требованиями к защите окружающей среды в проектах АСУТП предусматриваются датчики экологического контроля, системы автоматического определения выбросов и управления клапанами аспирации на шихтоподаче и литейном дворе.

Появились локальные вычислительные сети, объединяющие полевое оборудование и обеспечивающие значительное сокращение количества дорогостоящих кабелей. Однако, целесообразность их применения для ряда особо точных измерений сомнительна. Например, контроль перепада температур воды на холодильниках печи или массы шихты требует размещения аналого-цифровых преобразователей (АЦП) в термически стабильном помещении, а сигналы параметров входной и выходной воды, охлаждающей каждый конкретный элемент, рекомендуется подключать к одному и тому же АЦП для исключения его погрешности (при расчете разницы температуры или расхода). Это касается и термопар для контроля разгара горна — необходимо выдерживать стабильные условия для улучшения повторяемости измерений параметров процессов, методично развивающихся в течение многих месяцев. Особо важные датчики также должны иметь самостоятельные каналы ввода в программируемые контроллеры, независимые от работоспособности полевых сетей. Возможное применение для таких сетей — объединение датчиков температуры тела холодильников, температуры кожуха печи, воздухонагревателей, трубопровода горячего дутья, желобов литейного двора и т.п.

В последнее время проявилась тенденция ухудшения качества технологического и механического оборудования, как отечественных, так и ведущих зарубежных фирм. Наличие проблем у последних, вероятно, связано с переносом производства в развивающиеся страны. Как обычно, поиск виновников простоев из-за поломок оборудования в первую очередь начинают с разработчиков или эксплуатационников АСУ ТП и автоматизированного электропривода.

В последнее время в АСУ ТП используется структура «сервер-клиент» на базе известных пакетов визуализации. Несколько лет назад на одной доменной печи происшедшим пожаром были выведены из строя основные и резервные серверы, экстренная остановка доменной печи производилась с помощью соответствующего пульта и инженерной машины. С тех пор, в новых проектах на каждом пункте управления доменной печью или шихтоподачей наряду со станциями-клиентами предусматривается одна рабочая станция, имеющая независимый от серверов пакет визуализации.

Немаловажное значение имеет и компоновка выходных видеокадров системы визуализации, которая должна обеспечивать удобство пользования технологическим персоналом, т.е. необходимо свести к минимуму лишние переключения экранных форм при рассмотрении и управлении связанными технологическими процессами. Это касается как динамических схем, так и трендов. Основные параметры на мнемосхемах должны выделяться цветом, размером, яркостью по сравнению со вспомогательными измерениями. Степень готовности современных АСУ ТП должна соответствовать необходимости безошибочного пуска комплекса доменной печи в штатном режиме, т.е. требуется однозначное понимание эксплуатационным персоналом любого символа, параметра, тренда, элемента управления, предусмотренного разработчиком. Времена, когда, вследствие наличия проблем у некоторых разработчиков, пуск печи производился с помощью локальных приборов и сигнализации на мнемосхемах, а внедрение программируемых средств откладывалось на 3–6 месяцев, ушли в прошлое.

Таким образом, разработчику систем автоматизации полевого уровню, так и разработчикам программируемых контроллеров и систем визуализации, необходимы уверенные знания в технологии, оборудовании и механизмах доменного производства и сопутствующих процессов. Что показывать технологу, когда система определяет недостоверность контролируемого параметра? Оставить последнее достоверное значение? Показывать то, что есть? Этот вопрос возник при внедрении первой в СССР системы цветной визуализации на доменной печи (ДП-5, «Северсталь»). Принято решение, исполняемое до сих пор, — не индицировать («стирать») любое значение зафиксированного неисправного параметра. Это является сигналом для технолога о необходимости восстановления контроля и принятия решения об остановке печи или продолжении работы в ограниченных условиях в течение ремонта измерительного канала.

В составе АСУ ТП новейшей доменной печи России была разработана и внедрена самая большая система визуализации в доменном производстве (более 70000 входных тэгов) с использованием нового мощного СКАДА — пакета фирмы Шнейдер Электрик.

Единая визуализация почти всего комплекса доменной печи, разработанная одной организацией (ООО «ВНИПИ САУ-20», г. Москва), обеспечивает обмен данными с несколькими десятками контроллеров, разработанных разными отечественными и зарубежными фирмами (более 10 фирм), и с бо-

лее 20 контроллерами доменной печи и шихтоподачи разработки ВНИПИ САУ-20. Эта неподъемная, по мнению известной зарубежной фирмы — разработчика технологии данной печи, задача была решена ВНИПИ САУ-20 благодаря многолетнему опыту разработчика АСУ ТП.

Остался без ответа вопрос о представительности и своевременности информации о химсоставе шихты и продуктов плавки, отсутствуют соответствующие автоматические анализаторы с достаточной надежностью и точностью.

Большое распространение получили системы автоматического определения прогара фурм с использованием принципа расчета потери охлаждающей воды. Простота, на первый взгляд, этого метода приводит к ошибочным решениям, т.к. в алгоритме распознавания необходимо учитывать множество причин развития прогара. Мало кому известно, что в некоторых случаях прогара происходит не потеря, а наоборот, появление как бы «дополнительной» воды. Обычный арифметический расчет не обеспечивает уверенное определение прогара при небольших повреждениях фурм — величина потери расхода воды не превышает уровень «белого шума». Сейчас на некоторых печах предусматривается использование этого метода для автоматического контроля протечек воды в плитовых холодильниках. Процессы возникновения протечек резко отличаются от процессов прогара фурм и зависят от типа холодильника (медный или чугунный), его места размещения (лещадь или низ шахты), вида перемычек между холодильниками (гибкое соединение или нет).

Регулирование расхода природного газа на доменную печь и распределение природного газа по фурмам являются взаимно зависимыми задачами. Одновременное использование всех этих контуров управления в автоматическом режиме при помощи стандартных непрерывных регуляторов в условиях сообщающихся сосудов приводит к нестабильности процесса (раскачка), что в 70-х гг. было показано в публикациях работников Киевского института автоматики и «Азовчерметавтоматики». В результате использования специального многоканального регулятора можно снизить риск появления колебаний в схеме управления.

Одним из важных требований к АСУТП является подготовка исходных данных для систем верхнего уровня. Следует отметить, что в принципе АСУ ТП предоставляет системам верхнего уровня более достоверную информацию, по сравнению с данными химанализов, сопровождающими партии шихты.

Особый интерес вызывает метод определения уровня расплава в горне, основанный на измерении потенциалов на кожухе. Многолетние результаты работы на разных печах показывают действенность этого метода на печах малого объема, в частности, на типовых печах можно наблюдать на тренде одновременно и колебания уровня расплава, и изменения нагрева горна. Что же касается печей большого объема, то перекрытия выпусков и, вероятно, условия дренажа не позволяют технологическому персоналу уверенно принимать к действию результаты автоматического контроля по сравнению с расчетом выхода чугуна из загруженной подачи. Основные технические проблемы этого метода — отсутствие серийного промышленного высокоточного преобразователя и необходимость компенсации колебаний термоэдс материала кожуха доменной печи.

К настоящему времени все крупнейшие меткомбинаты России практически завершили оснащение своих доменных печей современными АСУ ТП (в части нижнего уровня). В основном использовалась продукция фирмы Сименс, в меньших объемах — фирмы Шнейдер Электрик, еще реже фирмы Омрон, в единичных случаях — контроллеры Аллен Брэдли. Украинская тройка лидеров выглядит следующим образом: Аллен Брэдли, Сименс, Шнейдер Электрик. Казахстан ориентирован только на Сименс.

В современной практике ВНИПИ САУ-20 разработал ряд ниже приведенных нестандартных задач, в большинстве случаев, связанных с особенностями и составом комплекса проектируемых доменных печей ОАО «НЛМК».

Система автоматического поиска оптимального соотношения газ—воздух для нагрева воздухонагревателя

Данная система непрерывно, в автоматическом режиме, воспроизводит аналогичные действия газовщика по подбору заданного соотношения. При достижении заданной температуры купола система изменяет свою структуру с целью стабилизации фактической температуры. Для функционирования этой системы не требуется применения ни калориметра смешанного газа, ни анализатора химсостава доменного газа, ни анализаторов CO и O_2 в дымовых газов. Особенно эффективна работа системы в условиях

отопления блока воздухонагревателей только доменным газом с достаточной степенью изменения его калорийности. Система внедрена на нескольких доменных печах России, Украины и Пакистана.

Система автоматического регулирования скорости набора доз кокса, агломерата и окатышей

Системы обеспечивают адаптивное управление расходом шихты в весовые воронки с целью поддержания качества грохочения материала. Реализованы на 14 каналах дозирования шихты ДП-7 ОАО «НЛМК».

Система автоматического формирования многокомпонентных порций шихты на главном конвейере

Система обеспечивает контроль достоверности и исполнимости программы работы шихтоподачи, ее синхронизацию с программой работы бесконусного загрузочного устройства. Реализована на ДП-6 (до 7 компонентов в порции) и ДП-7 (до 9 компонентов) ОАО «НЛМК». Система управляет укладкой каждого компонента на главный конвейер с учетом заданных смещений по отношению друг к другу, при этом принимается во внимание расположение весовых воронок и фактическая скорость выгрузки каждого компонента. В системе функционирует три модели: одна управляющая, две — поисковые. Системы обеспечивают исполнение любых проектных вариантов программ работы.

Система автоматического регулирования скорости выгрузки компонентов порции

Системы обеспечивают адаптивное управление расходом шихты на главный конвейер с целью поддержания заданной длины укладки каждого компонента порции. Реализованы на 21 канале дозирования шихты ДП-7 ОАО «НЛМК».

Система слежения за прохождением шихты и сопровождения ее информацией об ее химсоставе

Эта система разработана специально для ДП-7, в комплекс которой входит склад привозного кокса, приемное устройство, бункерная эстакада и сеть конвейеров с перегрузочными узлами. Система обеспечивает оперативное представление технологическому персоналу информации о химсоставе шихты, находящейся в любом месте до БЗУ. В пунктах приема шихты предусмотрен ручной ввод химсостава поступившего материала (до 13-ти показателей) на основании сертификатных данных от поставщиков. Проектное число видов шихты — до 30-ти. Слежение ведется на основании работы механизмов, датчиков наличия шихты на конвейерах, положения передвижных конвейеров. В процессе слежения обеспечивается контроль положения виртуальных границ между разными партиями одного и того же вида шихты.

Система автоматического контроля и управления формированием запаса шихты в стационарных

бункерах бункерной эстакады

Эта система также разработана специально для ДП-7. Система по каждому стационарному бункеру и по каждому виду шихты обеспечивает контроль фактического запаса шихты, расчет максимально возможного запаса, расчет резерва на прием шихты по каждой из двух линий загрузки, при этом учитываются горизонтальные переносы шихты. На основании расчетов расхода шихты, поступающей в систему конвейеров, и сопоставления с резервом на прием система формирует сигналы на переход загрузки на резервную емкость (с тем же видом шихты), либо сигнал на прекращение подачи шихты на бункерную эстакаду с очисткой конвейерных лент при гарантированном предотвращении пересыпания стационарных бункеров.

2. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОДЕРЖАНИЯ АСУ ТП ДП

Эффективное управление таким сложным агрегатом как доменная печь требует знания газодинамических, тепло- и массообменных процессов, протекающих по всей высоте (от уровня засыпи до чугунной лётки) и сечению (вертикальному и горизонтальному) доменной печи.

Закрытость доменного процесса определяет следующие пути его изучения: экспериментальные исследования действующих объектов; физическое моделирование; математическое моделирование. Очевидно, что математическое моделирование — единственный способ получения закономерностей доменной плавки, необходимых для её управления. Использовались следующие виды математических моделей (ММ) доменной плавки: кинетические; динамические; балансовые; статистические; пересчетные (расчетное восстановление оптимальных режимов); ситуационные (экспертные системы).

Разработкой математического описания доменного процесса занимались в СССР и занимаются в настоящее время в СНГ следующие группы организаций:

- научно-исследовательские институты (НИИ): ЦНИИЧЕРМЕТ (г. Москва), ИЧМ (г. Днепропетровск), ВНИИМТ (г. Свердловск), Донниичермет (г. Донецк), ВНИПИ САУ (г. Москва) и др.;
- высшие учебные заведения (ВУЗы): МИСИС (г. Москва), ЛПИ (г. Ленинград), ДМетИ (г. Днепропетровск), УПИ (г. Свердловск), ДПИ (г. Донецк), МГМИ (г. Магнитогорск), СМИ (г. Новокузнецк), КМИ (г. Алчевск) и др.;
- институты Академии наук (АН) СССР: Институт металлургии им. Байкова (г. Москва) и Институт металлургии Уральского отделения (УО) АН (г. Екатеринбург);
- научно-внедренческие организации: ООО «АКОММ» (г. Москва) и др.

2.1. Работы НИИ

Наиболее серьёзные работы в этом направлении проводились в головном институте отрасли по металлургии чугуна ИЧМ (г. Днепропетровск) и ВНИИМТ (г. Свердловск). Оба эти института имели специалистов, занимавшихся аналитическим описанием доменного процесса, и серьёзную экспериментальную базу, позволявшую проводить экспериментальные исследования как на действующих доменных печах, так и на их физических моделях.

2.1.1. Работы ВНИИМТ

Работы по созданию АСУ ТП ДП [1, 2], проводившиеся под руководством выдающегося советского ученого В.Н. Тимофеева, сопровождались созданием наиболее полного математического описания доменного процесса [3–7]. Другое направление [8–12] в разработке математического описания доменного процесса, проводившееся во ВНИИМТ, следовало следующим условиям:

- исследовать доменную плавку и управлять ею можно только комплексно;
- разработка ММ, необходимых для анализа и управления доменной плавкой, должна проводиться в соответствии со следующими принципами:
  — модель должна разрабатываться под конкретную задачу;
  — чем модель проще, тем лучше;
- ММ должна использовать показания только серийных датчиков, которые уже установлены на печи. В необходимых случаях должны быть разработаны простые и надежные средства контроля, такие как радиальные многоточечные термопары, датчики теплового потока и теплосъёма с воздушных фурм;
- наиболее эффективными могут быть пересчетные модели, позволяющие проводить расчетное восстановление оптимальных режимов плавки от достигнутого уровня и с использованием исходных данных, полученных при этом. Это уменьшает влияние возможных ошибок в исходных данных о составе загружаемой шихты и о параметрах работы печи;
- аналитическое описание доменного процесса только тогда может быть готовым к практическому использованию, когда оно прошло проверку как экспериментами на действующих печах, так и анализом их работы с помощью ММ «в пакетном режиме» по контрольным выборкам данных о работе доменных печей.

В итоге исследований, проводимых по схеме «теория — эксперимент — внедрение», получены следующие основные результаты:

- разработаны ММ, описывающие и контролирующие газодинамические, тепло- и массообменные процессы по высоте и сечению доменной печи от уровня засыпи до чугунной лётки. По своему

содержанию и возможностям ММ не уступают лучшим зарубежным разработкам, а некоторые — превосходят их. Так «модель нагрева горна печи», описывающая газодинамические, тепло — и массообменные процессы в двух нижних зонах доменной печи — фурменных очагов (третья зона) и окончательного формирования состава и нагрева продуктов плавки (четвёртая зона) — единственная в мире. Модель опубликована в Австралии в 1981г. в трудах «INTERNATIONAL BLAST FURNACE HEARTH AND RACEWAY SYMPOSIUM» [9];

- экспериментами на действующих печах ММК, НТМК, КарМК, ЧелМК и Тулачермет и анализом их работы с помощью ММ в «пакетном режиме» доказана адекватность разработанных ММ реальным процессам, протекающим в доменной печи. Например, для проверки адекватности разработанной модели горна и разработки приёмов адаптации её к реальным условиям доменной плавки были проведены уникальные исследования по зондированию фурменного очага ДП-6 и ДП-10 ММК. Результаты исследований опубликованы в Австралии в 1981г. в трудах «INTERNATIONAL BLAST FURNACE HEARTH AND RACEWAY SYMPOSIUM» [10]. Некоторые рекомендации, полученные в результате анализа работы доменных печей с помощью разработанных ММ, были внедрены в практику работы печей ММК и других металлургических предприятий с положительным эффектом.

К сожалению, по ряду объективных и субъективных причин проводившиеся работы по обоим направлениям математического описания доменного процесса так и не завершились внедрением ВУ АСУ ТП доменной печи.

2.1.2. Работы ИЧМ

В это же время группа специалистов ИЧМ занималась разработкой ММ для управления тепловым состоянием строящейся ДП №5 ЧерМК. В 1984 г. по предложению ВНИПИ САУ, ответственного за создание АСУ ТП этой печи, в Днепропетровске было проведено Всесоюзное совещание с участием всех организаций и специалистов, имеющих отношение к данной проблеме, с целью оценки проделанной ИЧМ работы и определения возможности использования её результатов в составе ВУ АСУ ТП ДП-5. Предварительно ИЧМ разослал всем предполагаемым участникам совещания отчет о проделанной работе.

Из представленного отчета можно заключить, что авторами была разработана и реализована на ЭВМ динамическая модель доменной печи, которая была положена в основу алгоритма контроля нагрева печи и прогноза изменений в нем. Однако представленная работа имела существенные недостатки, которые можно было разделить на две основные группы: недостатки модели и недостатки подхода к созданию АСУ тепловым состоянием печи.

К недостаткам модели можно отнести следующие факторы:

- не рассматриваются газодинамические, тепло- и массообменные процессы, протекающие в фурменных очагах и в зоне окончательного формирования состава и нагрева чугуна и шлака. В результате этого в модели принято допущение о том, что температура чугуна (t»4) соответствует температуре продуктов плавки на выходе из «шахты» (t»2), а за температуру газов, вступающих в теплообмен с шихтовыми материалами (Т»3), принимается теоретическая температура горения (Тт). Как показали проведённые нами расчеты, t»2 может отличаться от t»4 на 200–300°С как в сторону более низких, так и более высоких значений, а Т»3 — от Тт на 200–500°С;
- не рассматриваются протекающие в печи газодинамические процессы;
- одномерность модели, не позволяющая хотя бы приближенно оценить местоположение и форму зоны когезии.

Отмеченные недостатки модели ставят под сомнение эффективность прогноза содержания кремния в чугуне, а также обоснованность выбора управляющих воздействий для достижения оптимального теплового состояния печи. Косвенным подтверждением данного вывода могут служить некоторые приведённые в отчете данные, показывающие изменение показателей плавки при изменении ее входных параметров. Так, например, в результате расчетов с использованием разработанной модели данные о транспортном запаздывании по каналу «рудная нагрузка-температура чугуна» составляли только в два часа. Известно, что время пребывания шихтовых материалов в печи составляет не менее 6–8 часов.

Следовательно, только через это время может измениться содержание кремния в чугуне и его температура после изменения рудной нагрузки.

К основным недостаткам подхода к созданию АСУ тепловым состоянием доменной печи можно обнести следующие факторы:

- не решаются вопросы оптимизации количества и состава дутья, распределения газа по окружности и радиусу печи. Без решения этих вопросов трудно говорить об оптимизации теплового состояния доменной печи;
- не предложены и не обоснованы критерии оптимизации важнейших сторон доменной плавки. В частности, не ясно, что принято в качестве критерия оптимизации теплового состояния печи.

Работа ИЧМ по разработке математического описания ВУ АСУ ТП строящейся ДП-5 ЧерМК была остановлена.

2.1.3. Работы ВНИПИ САУ

Основными направлениями работы ВНИПИ САУ (с 1986 по 1992 г) были.

2.1.3.1. Разработка ММ.

2.1.3.2. Внедрение ММ в составе ВУ создаваемых институтом АСУ ТП доменных печей, в т.ч. в составе ВУ АСУ ТП ДП — 5 ЧерМК в 1987–1989 гг., ДП-1 ЧерМК в 1990–1991гг., ДП-1 и ДП-2 металлургического завода в Визакхапатнаме (Индия) в 1989–1991 гг. В 1991 г. по договору с КарМК были разработаны «Основные технические решения» на создание АСУ ТП ДП № 3, которые были утверждены главным инженером комбината в январе 1992 г. По своему технологическому насыщению создаваемая АСУ ТП могла быть наиболее полной в СССР.

Как видно из представленных сроков внедрения и разработки ВУ АСУ ТП, все они проводились до 1992 г. С развалом Союза и с упадком производства работы по созданию ВУ АСУ ТП доменных печей металлургических предприятий СНГ были практически прекращены вплоть до настоящего времени. В итоге ни на одной доменной печи СНГ до настоящего времени не реализованы АСУ ТП с ММ.

2.2. Работы ВУЗов

В силу ряда причин наука в ВУЗах часто ограничивалась аналитическим описанием доменного процесса. Для создания математических моделей, закладываемых в основу математического обеспечения создаваемых АСУ ТП, в основном, использовали балансовые методы, основанные на мгновенных тепловых балансах. Во многих отечественных (МИСиС, ДМетИ, ЛПИ, ДПИ, УПИ и др.) системах пытались по составу колошникового газа составить тепловой баланс плавки и определять на его основе такие показатели плавки как производительность печи и расход кокса. Поэтому же пути часто шли отечественные (ЦНИИЧермет) и зарубежные (ИРСИД) НИИ. Подробный и детальный анализ использованных в этих системах алгоритмов представлен в работе [13].

К сожалению, все попытки внедрения подобных систем закончились безрезультатно. Нигде на доменных печах СНГ эти системы в настоящее время не работают. Причинами этого могут быть:

- ненадёжность работы автоматических газоанализаторов колошникового газа. Эта проблема не решена до сих пор;
- недостатки математической постановки задач и используемого математического обеспечения создаваемых систем, вызвавшие необходимость принятия допущений, снижающих ценность используемого метода. К ним относятся допущения о том, что невязка между приходной и расходной частями баланса равна нулю, принятие некоторых статей баланса за константы, упрощение характерных для данной системы формул по определению некоторых статей баланса и т.д.

2.3. Работы научно-внедренческих организаций

Сокращение или даже прекращение научно-исследовательский работ в НИИ и в вузах, а часто даже их закрытие, привели к тому, что работы по разработке математического описания доменного процесса были практически прекращены. Однако полученные ранее результаты аналитических и экспериментальных исследований позволяли их использовать (даже без проведения новых исследований) в технологическом насыщении создаваемых АСУ ТП доменных печей. По такому пути

пошло, созданное в 1992 г. научно-внедренческое предприятие ООО «АКОММ». Для внедрения использовали результаты исследований, проведённых в течение длительного времени (с1959 по 1986 гг.) во ВНИИМТ, и опыт работы по созданию АСУ ТП доменных печей и их технологического насыщения, полученный (с 1986 по 1992 гг.) во ВНИПИ САУ (г. Москва) (таблица 1).

В 1994 г. фирма Сименс пригласила ООО «АКОММ» участвовать в создании ВУ АСУ ТП ДП-3 КарМК с использованием предлагаемых ООО «АКОММ» ММ, а не моделей фирмы Тиссен (Германия), которые она использовала обычно. Был подготовлен и передан на комбинат контракт, который были включены задачи, представленные в колонке 6 таблицы 1. Однако в связи с развалом комбината работы по созданию базовой автоматизации (БА), которые выполняла фирмы Сименс, были приостановлены, а работы по ВУ так и не были начаты.

В 1997–1998 гг. ООО «АКОММ» участвовало в работах по технологическому насыщению АСУ ТП ДП № 1 ММК за счет включения в состав ВУ технологических задач по оптимизации расхода дутья и радиального газораспределения. Разработка АСУ ТП специалистами комбината была ориентирована на не совершенную отечественную микропроцессорную (Ш-711), вычислительную (ТВСО-1634) и газоаналитическую («Метек») технику. Это не позволило получить положительные результаты от внедрения ММ в составе ВУ АСУ ТП ДП-1.

С 1998 по 2001 гг. ООО «АКОММ» руководило работой по внедрению ВУ АСУ ТП ДП-3 «Запорожстали» (Украина). Программное обеспечение всех предложенныъх технологических систем было отлажено на объекте. Однако ряд решений, принятых разработчиками нижнего уровня АСУ ТП («Укргипромез», г. Днепропетровск), не позволил завершить начатую работу. К ним относится установка ремиконтов «Р-130» производства завода в г. Ивано-Франковск (Украина), газоанализаторов «ГАУ-ДМ» (г. Смоленск), охлаждаемых радиальных термозондов Донниичермета (г. Донецк) и др. Функционирование ВУ АСУ ТП оказалось невозможным также из-за того, что комбинатом не были решены следующие технические вопросы: автоматическое поступление информации с вагон-весов о массах загружаемых в доменную печь железорудных материалах и добавках, автоматическая регистрация времени открытия и закрытия чугунных лёток, получение информации о распределении температуры газа по окружности печи над уровнем засыпи и т.д.

Опыт создания ВУ АСУ ТП доменных печей определил подход к проведению подобных работ в настоящее время: создание технологически насыщенных АСУ ТП надо начинать с небольшой системы, но чтобы она надёжно работала и помогала мастеру печи управлять плавкой. Дальше постепенно дополнять их. Именно по такому пути пошли на ММК [14–20]. Начиная с 2006 г. ООО «АКОММ» проводит работу в доменном цехе ОАО «ММК» по технологическому насыщению АСУ ТП, созданных на печах в разное время, за счет поэтапного внедрения автоматизированной системы контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки (АСКОП ДП). Результаты работы представлены в докладе, включенном в настоящий сборник [21].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

3.1. Проведённый анализ показал, что разработанные в России системы автоматизации не уступают, а по некоторым позициям превосходят зарубежные аналоги.

3.2. Улучшение технических и программных средств, используемых при создании АСУ ТП доменных печей, и имеющееся в России математическое обеспечение позволяют проводить работы по созданию АСУ ТП доменных печей и технологическому насыщению создаваемых и созданных АСУ ТП доменных печей. Создаваемые системы по своим техническим возможностям и технологическому содержанию не будут уступать зарубежным образцам, а по некоторым позициям будут превосходить их.

3.3. Особенно остро вопрос необходимости технологического насыщения созданных и создаваемых АСУ ТП доменных печей стоит в настоящее время при переводе печей на вдувание пылеугольного топлива.

Список литературы

1. В.Н. Тимофеев, Н.М. Бабушкин, Н.К. Большакова и др. Автоматическое управление ходом доменной печи с помощью управляющей машины (опытная схема). «Теплотехника доменного и агломерационного процессов». Сборник трудов ВНИИМТ № 14. «Металлургия». М., 1966, С. 220–228.
2. В.Н. Тимофеев, Н.М. Бабушкин, Н.К. Большакова и др. Об управлении тепловым режимом доменных печей «Теплофизика и теплотехника в металлургии». Сборник трудов ВНИИМТ № 19. «Полиграфист», г. Свердловск, 1969, С. 45–52.
3. В.Н. Тимофеев, Б.А. Боковиков, Н.М. Бабушкин. Математическое описание явлений тепло- и массообмена в доменной печи. «Теплотехника доменного и агломерационного процессов». Сборник трудов. «Металлургия». М., 1966, с. 5–18.
4. В.Н. Тимофеев, Б.А. Боковиков. Кинетика процесса восстановления в слое. «Теплотехника доменного и агломерационного процессов». Сборник трудов ВНИИМТ № 19. «Металлургия». М., 1966, с. 19–37.
5. Б.А. Боковиков. Основные закономерности нестационарного процесса восстановления в противотоке. «Теплотехника доменного и агломерационного процессов». Сборник трудов. «Металлургия». М., 1966, с. 38–58.
6. Б.А. Боковиков, В..Н. Тимофеев, Н.М. Бабушкин. Теплообмен в противотоке при наличии химических реакций. «Тепло- и массообмен в слое и каналах, теплотехника доменных и теплообменных аппаратов». Сборник трудов. «Металлургия». М., 1970, с. 3–12.
7. Б.А. Боковиков, В..Н. Тимофеев, Н.М. Бабушкин. Нестационарность доменного процесса в связи с вопросами управления тепловым состоянием доменной печи. «Тепло- и массообмен в слое и каналах, теплотехника доменных и теплообменных аппаратов». Сборник трудов. «Металлургия». М., 1970, с. 92–97.
8. В.М. Паршаков. Теплообмен в шахте доменной печи и его влияние на расход кокса. «Повышение производительности и экономичности работы тепловых металлургических агрегатов». Сборник трудов. «Металлургия». М., 1982, с. 49–53.
9. V.M.Parchakov, B.A.Bokovikov, F.P.Shklar et al. Mathematical model for the gas flow dynamics and heat and mass transfer processes in the hearth of a blast furnace and its use in the analysis of smelting. «International blast furnace hearth and raceway symposium». Australia, Newcastle, 1981, p.15-1–15-6.
10. V.M.Parchakov, P.B.Fedotov, F.P.Shklar et al. The extent of raceways in a blast furnace and its dependence on combined blast parameterws. «International blast furnace hearth and raceway symposium». Australia, Newcastle, 1981, p.5-1–5-4.
11. В.М. Паршаков, Т.Ю. Каширская, Ф.Р. Шкляр, Б.А. Боковиков и др. Упрощенная модель доменной плавки. «Проблемы автоматизированного управления доменным производством». Выпуск 6. ЦНИИТЭ Приборостроения. М., 1983, с. 26.
12. В.М. Паршаков, Т.Ю. Каширская, В.А. Заболотских. Двумерная модель теплообмена в доменной печи. «Теплотехническое обеспечение основных технологических процессов чёрной металлургии». Сборник трудов. «Металлургия», М., 1988, с. 22–25.
13. А.А. Гиммельфарб, Г.Г. Ефименко. Автоматическое управление доменным процессом. М., «Металлургия», 1969, 309 с.
14. В.М. Паршаков, А.А. Третяк, А.П. Уланов. АСУ ТП доменной плавки и её технологическое насыщение. Доменное производство — XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков. — М.: Издательский дом «Кодекс», 2010.- С. 391–413.
15. В.М. Паршаков, Р.С. Тахаутдинов, Ю.А. Бодяев и др. Контроль радиального газораспределения в оборудованных БЗУ доменных печах ММК с помощью многоточечных термозондов. «Сталь», 2009, № 10, с. 16–19.
16. В.М. Паршаков, А.В. Чевычелов, А.А. Полинов и др. Внедрение системы оптимизации параметров дутья на доменных печах ОАО «ММК». Доменное производство — XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков. — М.: Издательский дом «Кодекс», 2010. С. 426–441.

17. В.М. Паршаков, А.В. Чевычелов, А.А. Полинов и др. Внедрение на доменных печах ОАО «ММК» автоматизированной системы контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки. Труды Международного конгресса доменщиков. Ялта, 2012, с. 274–307.
18. В.М. Паршаков, А.В. Чевычелов, А.А. Полинов и др. Повышение эффективности доменной плавки за счет технологического насыщения АСУ ТП, созданных на доменных печах ОАО «ММК». «Инженерные решения. Черная металлургия», 2012, № 2, с. 2–6.
19. В.М. Паршаков, А.В. Чевычелов, А.А. Полинов и др. Внедрение непрерывного автоматического контроля радиального газораспределения в доменных печах. Труды Международного конгресса доменщиков. Ялта, 2013, с. 358–375.
20. В.М. Паршаков, А.В. Чевычелов, А.А. Полинов и др. Использование БЗУ лоткового типа для управления радиальным и окружным распределением шихты в доменных печах. Труды Международного конгресса доменщиков. Ялта, 2013, с. 376–385.
21. В.М. Паршаков, А.А. Полинов, А.В. Павлов и др. Повышение эффективности доменной плавки за счет технологического насыщения АСУ ТП доменной печи (Доклад в настоящем сборнике).

В.В. Кочура, С.Л. Ярошевский, В.И. Купенко, ДонНТУ

КОНТРОЛЬ СТЕПЕНИ СГОРАНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПО АНАЛИЗУ ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что одним из важнейших условий использования пылеугольного топлива (ПУТ) в доменной плавке является обеспечение его полного сгорания в пределах фурменных зон. Поэтому контроль степени сгорания ПУТ является важной задачей.

Количественный метод определения полноты сгорания топлива в фурменных зонах разработан проф. С.Л. Ярошевским и испытан на доменных печах (ДП) Донецкого металлургического завода [1, 2]. Эксперименты по определению полноты сгорания ПУТ проводили с помощью водоохлаждаемой трубы-зонда. Расход ПУТ во время исследований составлял 50, 100 и 150 кг/т чугуна. Микроструктурный анализ большого количества проб материалов, отобранных из различных точек горна, показал, что уже на срезе фурм размер частиц угольной пыли уменьшается. Полное сгорание пылеугольного топлива происходит на расстоянии 0,6–0,8 м от среза фурмы. Интенсивное горение пылеугольного топлива начинается еще до его поступления в фурменную зону: на срезе фурмы сгорает 50–70% топлива. При увеличении расхода ПУТ значительно расширяется зона распространения частиц топлива в горне.

Методика исследования полноты сгорания ПУТ в доменной печи по анализу продуктов плавки основана на идентификации и количественной оценке несгоревших частиц углерода ПУТ, вынесенных из доменной печи в составе колошниковой пыли, шламов и шлака. Указанная методика опробована и применяется в отечественной и зарубежной практике [3–6].

Исследованием степени сгорания ПУТ, проведенным с использованием петрографического анализа продуктов плавки на мощных

(более 4000 м^3) доменных печах комбината Баостил, (Китай), показана неполнота сгорания ПУТ 1,1% и 2,6% при вдувании в горн 178 и 240 кг/т чугуна ПУТ: при этом степень замены кокса ПУТ составляла около 40%, расход кокса на 1 т чугуна был менее 300 кг/т чугуна, увеличение неполноты сгорания до 2,6% при вдувании ПУТ 240 кг/т чугуна еще не препятствовало устойчивой и производительной работе доменной печи [4].

Для контроля полноты сгорания ПУТ в условиях фурменных зон ДП-1 и ДП-2 полезным объемом 1033 м^3 ПрАО «Донецксталь» — металлургический завод» (ПрАО «Донецксталь» — МЗ») использовался петрографический анализ содержания несгоревших частиц ПУТ в колошниковой пыли и шлаке, а также химический анализ доменного шлака и колошниковой пыли. Промышленная эксплуатация пылеугольного комплекса на ПрАО «Донецксталь» — МЗ» начата в сентябре 2002 г. Конструкция основной и модернизированной установки для приготовления ПУТ описана ранее [7].

На первом этапе исследований ДП-1 выплавляла передельный чугун из привозных агломератов и окатышей, доля последних в шихте изменялась от 35 до 65 %. Для повышения стабильности химического состава железорудной шихты в качестве основных компонентов использовали окатыши ОАО «ЛебГОК» и агломерат ОАО «ЮГОК», а в качестве основного топлива — кокс Донецкого участка Рутченковского КХЗ. ДП-1 работала без вдувания ПУТ, а ДП-2 с вдуванием 90–130 кг ПУТ на 1 т чугуна.

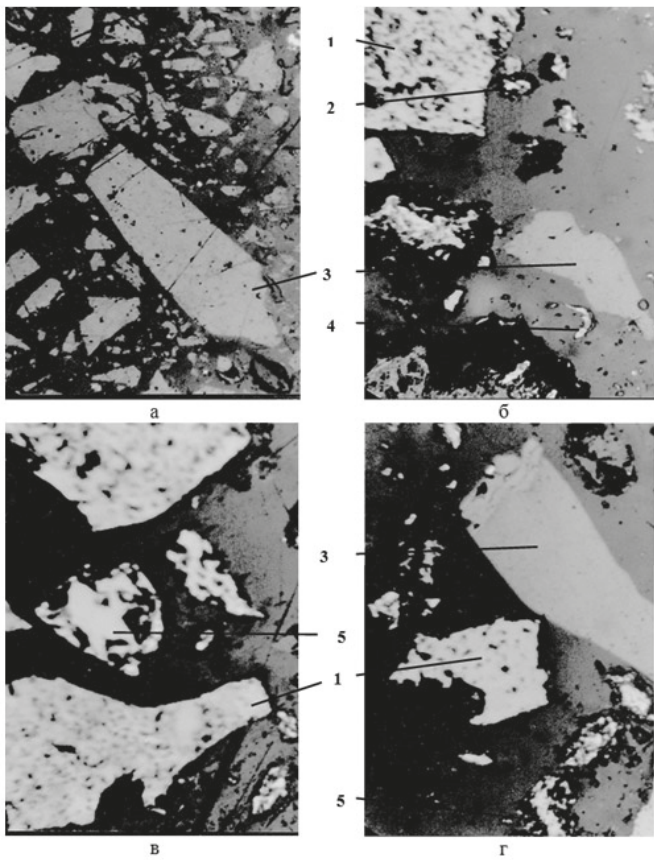
Показатели качества ПУТ характеризовались высокой тониной помола (30–50 мкм), низкой и устойчивой влажностью (менее 1%).

Суть метода подробно изложена в работах [8–10] и состоит в определении частичек углерода кокса и ПУТ, которые имеют различную форму и размеры, в продуктах доменной плавки с помощью петрографического анализа с применением методов рудной микроскопии и углепетрографии.

В петрографических исследованиях степени сгорания ПУТ в доменной печи применялся рудный микроскоп, позволяющий определять следующие диагностические свойства: коэффициент отражения (отражательная способность) и его дисперсию; эффекты поляризации; осность и оптический знак; окраску; относительную твердость; микрохрупкость; микропластичность; магнитность; форму и размер зерен (кристаллов). Методика исследования основывалась на определении оптических и других свойств минералов (их искусственных аналогов и некристаллических фаз), а также морфологии, структуры, степени кристалличности [11, 12].

Объектом исследования являлся полированный шлиф площадью 1–2 см^2, изготовленный на основе эпоксидной смолы из пробы анализируемого материала (угля, кокса, колошниковой пыли и шлака). Микроструктура шлифа ПУТ и колошниковой пыли приведена на рис. 1.

При микроскопическом изучении выполнялся подсчет объемных процентов содержания основных компонентов. Использовался один из общепринятых при минералогическом анализе — линейный метод. Вдоль системы параллельных линий, расположенных через 1 мм, подсчиты-



а — ПУТ, б и г — колошниковая пыль ДП-2, в — колошниковая пыль ДП-1; 1 — кокс, 2 — Fe_2O_3; 3 — уголь, 4 — графит, 5 — Fe_3O_4

Рис. 1. Микроструктура ПУТ и колошниковой пыли (х 537)

вали суммарную длину пересечений каждого компонента. Объемный процент компонента определяли по сумме длин пересечений, деленной на общую длину пересечений всех компонентов.

Результаты подсчетов основных компонентов, содержащихся в колошниковой пыли, отобранной на ДП-1, работающей без вдувания ПУТ и ДП-2 — с вдуванием 90–130 кг ПУТ на 1 т чугуна, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные компоненты колошниковой пыли

Компоненты	Содержание, объемное, %	
	ДП-2	ДП-1
Кокс	68,5	71,6
Магнетит	3,6	2,9
Магнетит в стекле	6,8	8,8
Магнетит с гематитом	4,1	4,9
Стекло с включениями металла	8,3	6,8
Рекристаллизованные шлакообразующие компоненты	3,5	3,7
Уголь	0,8	—
Графит	1,3	—
Лимонит	0,6	0,5
Карбонаты	0,5	0,8

Из табл. 1 видно, что в колошниковой пыли преобладает кокс (до 70%) в виде частичек размером в десятые-сотые доли миллиметров, в различной степени графитизированный. В этом отношении он не отличается от пылеватых частиц кускового кокса. Второй по распространенности компонент — магнетит, чаще всего встречающийся со шлакообразующими компонентами (стекло и поликристаллические образования). Микроструктура свидетельствует о его образовании при перекристаллизации шихты в пластичном состоянии или при кристаллизации (кристаллы в массе стекла) или при кристаллизации из силикатного расплава (дендриты).

Магнетит нередко замещается гематитом — частично или полностью. Шлакообразующие компоненты в виде стекла или поликристаллических масс часто содержат микроскопические капли металла (1–10 мкм).

Частицы угольной пыли практически не отличаются от исходного пылеугольного топлива. В отличие от кокса частицы угля не содержат пор и не графитизированы. Их отражательная способность и твердость значительно ниже, чем у кокса. Графит в виде пластинок размером до 0,4 × 0,02 мм не связан с другими компонентами и по морфологии резко отличается от графитизированных корочек на коксе. В небольшом количестве отмечается карбонат (ромбоэдрические осколки по спайности до 0,2 мм) и лимонит ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$). Соотношение объемов углеродсодержащих компонентов в колошниковой пыли составляет соответственно, %: кокс — 96,9; уголь — 1,2; графит — 1,9.

Микроструктура колошниковой пыли, отобранной на ДП-1, отличалась отсутствием несгоревшего угля и графита.

Вынос углерода с колошниковой пылью определялся расчетным путем по данным выноса колошниковой пыли и химическому анализу в ней углерода. Вынос колошниковой пыли за время исследования изменялся в диапазоне 73–194 т/т чугуна на ДП-1 и 72–145 т/т чугуна на ДП-2, а содержание углерода в колошниковой пыли от 7,4 до 19,07%. Вынос углерода с колошниковой пылью на тонну кокса на ДП-2 оставался ниже или незначительно превышал вынос углерода на ДП-1, что свидетельствовало о достаточно полной газификации углерода ПУТ в фурменных зонах ДП-2.

Исследования содержания углерода в доменном шлаке при вдувании ПУТ на ДП-2 и без вдувания ПУТ на ДП-1 проводились на основании химического анализа шлака на углерод и петрографического анализа. Незначительный прирост содержания углерода в шлаке на 0,004–0,033% при вдувании ПУТ

свидетельствует, что процесс горения угольных частиц в фурменных зонах не ухудшился, сохранился на достаточно высоком уровне.

На втором этапе исследований ДП-1 работала на окатышах СевГОК (1557 кг/т чугуна): производительность печи составляла 2000 т/сутки, расход кокса «Премиум» — 422 кг/т чугуна; ПУТ — 135 кг/т чугуна, железофлюса — 64 кг/т чугуна; расход известняка — 147 кг/т чугуна.

Во время эксперимента вдувалось ПУТ, приготовленное из смеси газового и тощего угля в соотношении 3:2. Показатели качества ПУТ характеризовались высокой тониной помола, стабильным техническим анализом (А = 10,35%; S = 0,99%; W = 1,58%, ЛВ = 30%). Средний медианный размер частиц ПУТ составлял 35 мкм (>80 мкм — 13,77%; 80–63 мкм — 8,9%; 63–0 мкм — 77,83%).

Для проведения петрографических исследований изготавливались брикеты из шлама газоочистки и колошниковой пыли, пылеугольного топлива и кокса, а также аншлифы, изготовленные из образцов шлака, отобранных в тот же период.

Химический анализ продуктов плавки ДП-1 приведен в табл. 2.

Таблица 2. Анализ проб шлака, шлама, колошниковой пыли и пылеугольного топлива, взятых для исследования полноты сгорания ПУТ на ДП №1 ПрАО «Донецксталь» — МЗ»

Таблица А — Химический анализ шлаков и соответствующих им чугунов

Наименование	Шлак		
	№ 1	№ 2	№ 3
[Si]	0,51	0,62	0,65
[Mn]	0,1	0,1	0,1
[S]	0,03	0,04	0,03
[P]	0,02	0,02	0,03
(SiO_2)	38,8	36,9	39,1
(Al_2O_3)	5,8	5,7	5,8
(CaO)	45,1	45,2	43,8
(MgO)	6,7	6,8	7,2
CaO/SiO_2	1,16	1,22	1,12

Таблица Б — Химический анализ проб шлама и колошниковой пыли

Наименование	Шлам № 1	Колошниковая пыль № 1	Шлам № 2	Колошниковая пыль № 2
SiO_2	7,2	5,1	8,6	11,3
CaO	6,2	3,4	4,5	6,6
MgO	0,8	0,4	0,6	0,9
MnO	0,168	0,19	0,154	0,18
$Fe_{общ}$	55,2	55,1	54,9	42,2
FeO	11,5	10,6	8,8	9
Fe_2O_3	63,5	66,2	63,7	49,6
Al_2O_3	0,25	0,2	0,38	0,85
ППП	3,5	14,7	3,9	19
TiO_2	0,42	0,56	0,72	0,56
C	3,5	14,4	3,5	16,1
S	0,42	0,12	0,72	0,169
P_2O_5	0,36	0,16	0,16	0,16
Na_2O	0,21	0,34	0,07	0,23
K_2O	0,24	0,7	0,11	0,46
Zn	0,11	0,13	0,18	0,13

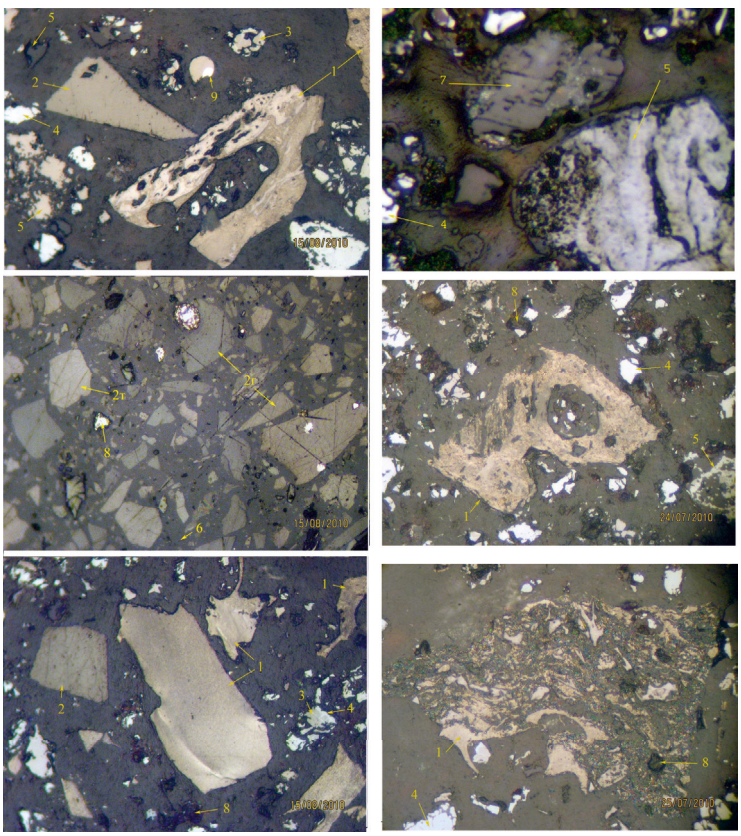
Продолжение табл. 2

Таблица В — Технический анализ ПУТ

Наименование	№ 1	№ 2
A	10,5	10,5
ЛВ	28,8	28,4
S	1,02	1,02

Морфология частиц кокса определялась макро- и микропористостью. Размер пор соответственно колебался от миллиметров до микрон. Почти полностью они сложены поликристаллическими агрегатами графита с размером частиц в несколько микрон. Кокс содержал большое количество обломков аналогичного состава скрытокристаллической структуры с субмикроскопической зернистостью (выглядят изотропными), а также включения шлакообразующих компонентов и фрагментов с реликтовой клеточной структурой. Часть пустот покрыта корочками перекристаллизованного графита толщиной в сотые доли мм. Отражательная способность графита R_o = 22%, двуотражение очень сильное, с изменением цвета от коричневатого до сине-серого. Термическое воздействие приводит к графитизации частиц кокса с поверхности и образованию новых пор.

Частицы пылеугольного топлива сложены бесструктурным витринитом- однородным гелефицированным изотропным компонентом. Изредка встречается структурный витринит, содержащий остатки растительной структуры. Форма частиц — угловатая, с количеством сторон от трех до пяти и сравнительно ровными ограничениями, поры отсутствуют.



1 — кокс; 2 — уголь; 2Т — уголь тощий; 2Г — уголь газовый; 3 — магнетит; 4 — гематит; 5 — силикаты; 6 — эпоксидная матрица; 7 — карбонаты; 8 — поры; 9 — металл

Рис. 2. Микроструктура ПУТ и колошниковой пыли (размер кадра по горизонтали составляет 0,125 мм)

Отражательная способность витринита зависит от марки угля. Так, по ГОСТу Украины 1996 г. R_o для газового угля составляет 7,3–8,8; для тощего угля 10,1–12,3%. По этому показателю, а также по изотропности он существенно отличается от кокса.

На рис. 2 визуально прослеживается отличие газового угля от тощего по отражательной способности (тощий уголь кажется светлее).

По причине низкой твердости частицы угля выделяются среди других компонентов обилием тонких царапин, от которых трудно избавиться при полировке.

Существенное значение имеет сравнительно широкий диапазон значений R_0 при небольшом разрыве между марками угля. В процессе дегазации потеря летучих компонентов сопровождается изменением R_0. Создается впечатление, что уголь марки Т при нагревании преобразуется по типу кокса, испытывая графитизацию с увеличением отражательной способности. На определенной стадии по оптическим свойствам он может приблизится к коксу. При этом сохраняются

отличия от кокса по особенностям микроструктуры и морфологии. Такой уголь следует отнести к частично использованному.

Частично использованный уголь марки Г отличается пониженной по сравнению с исходным отражательной способностью. Возможно, на ранней стадии преобразования потеря летучих компонентов и термическая диссоциация ведут к формированию субмикроскопических пор, понижающих этот показатель. Подобное явление наблюдается на конечных стадиях преобразования кокса.

Рудные компоненты представлены магнетитом Fe_3O_4 и гематитом Fe_2O_3. Магнетит чаще всего образует сростки неправильных зерен размером 30 мкм и менее. Включения магнетита в стеклообразных образованиях имеют вид правильных кристаллов, замещаемых гематитом (рис. 2). Гематит количественно преобладает над магнетитом.

Шлакообразующие компоненты представлены остаточным кварцем, карбонатами, а также силикатами. Последние образуют правильные кристаллы в массе силикатного стекла, образующего и самостоятельные частицы. Отражательная способность этих компонентов варьирует в зависимости от содержания железа. Стеклообразные частицы могут иметь отражательную способность, близкую к нулю. Однако они отличаются серыми или ярко-красными (за счет оксидов железа) внутренними рефлексами, в то время, как в угле они не наблюдаются. Существуют и морфологические отличия.

Все перечисленные компоненты встречаются как в виде отдельных частиц, так и в виде плотных комочков, составляющих единый агрегат. По всей вероятности это осколки железорудных окатышей.

Определено объемное содержание (%) указанных компонентов линейным методом. Этот метод основан на том, что отношения площадей, занимаемых сечениями зерен в плоскости шлифа, пропорциональны отношению длин линий, пересекающих эти сечения. В свою очередь отношения площадей сечений пропорциональны отношению объемов зерен. Измерения проводились с применением окуляра — микрометра. Брикет перемещался с помощью координатного препаратоводителя, снабженного линейками с нониусами, так, чтобы измерение сечений зерен выполнялось по системе параллельных линий через 1 мм.

Результаты подсчетов основных компонентов, содержащихся в шламе газоочистки и колошниковой пыли, отобранных на ДП-1, приведены в табл. 3. Сходимость результатов контролировалась измерениями на двух половинах брикетов — А и Б.

Из табл. 3 видно, что в шламе газоочистки преобладают оксиды железа (до 72%) и шлакообразующие (до 25%). Содержание кокса и угля составляет 3,4 и 0,012%.

В колошниковой пыли содержится примерно одинаковое количество оксидов железа (36%), шлакообразующих компонентов (34%) и кокса (30%). Содержание частиц угля в колошниковой пыли на порядок выше, чем в шламе и составляет 0,1% (табл. 3).

Химический анализ проб шлама и колошниковой пыли (табл. 2Б) качественно подтверждает более низкое содержание углерода в шламе (3,5%) по сравнению с углеродом колошниковой пыли (14–16%). Анализ результатов подсчета показывает удовлетворительную сходимость данных.

Размер частиц шлама газоочистки пыли, независимо от их состава, колеблется от долей микрон до 25 мкм. Частицы колошниковой пыли крупнее — до 50 мкм; небольшая часть достигает размеров 80–100 мкм.

Углеродсодержащие компоненты в шлаке не обнаружены. Стекловатая масса содержит поры размером от долей микрон и крупнее, а также тончайшие капельки металла. Наблюдается начало процесса рекристаллизации в виде тончайших дендритов и сростков удлиненных кристаллов силикатов.

Исследования полностью подтвердили выводы субъективного анализа и наблюдений, свидетельствующих о высокой степени газификации ПУТ в доменной печи: об этом свидетельствуют высокий уровень основных ТЭП плавки, минимальные простои и горение воздушных фурм, достаточные стабильность и устойчивость технологического процесса.

Результаты петрографических исследований показали, что содержание углерода ПУТ в шлаке — следы; в колошниковой пыли — 0,1 и шламе — 0,012 % (об.). Это значит, что свыше 99% углерода ПУТ газифицируется в ДП. Это является достаточно высоким результатом.

Таблица 3. Содержание основных компонентов на ДП-1 ПрАО «Донецксталь» —МЗ», об. %

В шламе газоочистки

Номер пробы	Часть брикета	Кокс	Уголь	Оксиды железа	Шлакообразующие компоненты
Без номера	А	2,08	–	64,79	33,13
	Б	2,61	–	67,80	29,59
	среднее	2,34	–	66,30	31,36
№1	А	3,65	0,01	75,28	21,06
	Б	3,50	0,01	74,07	22,42
	среднее	3,57	0,01	74,68	21,74
№ 2	А	2,93	–	65,75	31,32
	Б	3,57	0,03	72,93	23,47
	среднее	3,25	0,015	69,35	27,39
Среднее проб №1,2	среднее	3,41	0,012	72,02	24,56

В колошниковой пыли

Номер пробы	Часть брикета	Кокс	Уголь	Оксиды железа	Шлакообразующие компоненты
Без номера	А	18,68	0,19	46,93	34,20
	Б	23,53	0,14	39,52	36,81
	среднее	21,10	0,16	43,24	35,50
№1	А	28,73	0,05	34,91	36,31
	Б	26,80	0,07	34,79	38,35
	среднее	27,76	0,06	34,84	37,34
№2	А	33,69	0,13	37,79	28,39
	Б	28,22	0,06	36,74	34,98
	среднее	30,96	0,09	37,27	31,69
№3	А	29,74	0,12	35,44	34,71
	Б	33,46	0,19	36,88	29,47
	среднее	31,60	0,15	36,16	32,09
Среднее проб №1,2,3	среднее	30,11	0,10	36,09	33,70

ВЫВОДЫ

Эффективность применения ПУТ в доменной плавке определяется условиями его сгорания в печи.

Для контроля степени сгорания пылеугольного топлива в доменной печи предлагается использовать петрографический и химический анализ продуктов плавки, основанный на идентификации и количественной оценке несгоревших частиц углерода ПУТ, вынесенных из доменной печи в составе колошниковой пыли, шлама и шлака.

Проведенные петрографические и химические исследования полноты сгорания ПУТ по анализу продуктов плавки на доменных печах ПрАО «Донецксталь» — металлургический завод» показали достаточно полную 99% (объемные) степень газификации частиц угля при расходах ПУТ 90–130 кг/т чугуна.

Список литературы

1. Ярошевский, С.Л. Изучение процесса горения дополнительного топлива в фурменных зонах доменной печи / С.Л. Ярошевский С.Л., А.Т.Анисимов // Сталь. — 1985. — № 2. — С. 9–13.
2. Ярошевский, С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива / С.Л. Ярошевский. — М.: Металлургия, 1988. — 176 с.
3. Бабич, А.И. Интенсификация использования пылеугольного топлива в доменной плавке / А. И. Бабич, С.Л. Ярошевский, В.П. Терещенко. — К.: Техника, 1993. — 200 с.
4. Wu, K. Research of utilization factor of injected pulverized coal into BF at large PCI Rate/ K.Wu, W.Pan, W.Hu, et al. // Steel Research Int. — 2008. — No.12. — P. 904–907.
5. Shen, F. Technology progress and strategy in blast furnace ironmaking in China / F.Shen, T. Yang, B. Gao // Steel Research International. — 2005. — V. 76. — No.10. — P. 676–682.
6. Wu, K. Research on unconsumed fine coke and pulverized coal of BF dust under different PCI rates in BF at Capital Steel Co. / K. Wu, R. Ding, Q.Han, et al. // ISIJ International, Vol. 50 (2010). — No. 3. — P. 390–395.
7. Рыженков, А.Н. Технология доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива и природного газа на дутье, обогащенном кислородом / А.Н. Рыженков, С.Л. Ярошевский, Б.П.Крикунов, В.М. Замуруев, В.Е. Попов, В.В. Кочура // Сталь. — 2005 . — № 12. — С. 3–6.
8. Кочура, В.В. Исследование полноты сгорания пылеугольного топлива в доменной печи №1 ПрАО «Донецксталь» — металлургический завод» / В.В. Кочура, С.Л. Ярошевский, В.Е. Попов и др. // Металл и литье Украины, № 9–10, 2011. — С. 16–21.
9. Кочура, В.В. Совершенствование методики определения степени газификации пылеугольного топлива в доменных печах / В.В. Кочура, С.Л. Ярошевский, В.И. Купенко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2013. — № 4. — С. 3–6.
10. Кочура, В.В. Методика определения степени сгорания пылеугольного топлива в доменных печах / В.В. Кочура, С.Л. Ярошевский, В.И. Купенко и др. // Металлург. — 2013. — № 8. — С. 9–14
11. Перепелицин, В.А. Основы технической минералогии и петрографии. — М.: Недра, 1987. — 255 с.
12. Юшко, С.А. Методы лабораторного исследования руд. — М.: Недра, 1984. — 389 с.

А.А. Третяк, ООО «ТАЛС-1»,
В.М. Паршаков, В.А. Борисенко, ООО «АКОММ»,
М.В. Чемикосов, ООО «Аэротранс»,
А.П. Уланов, ООО «ВНИПИ САУ – 20»

ДОСТОВЕРНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ГАЗОВОГО ПОТОКА ПО РАДИУСУ КОЛОШНИКА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ, ПОЛУЧАЕМОЙ РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ ИЗМЕРЕНИЙ

Вопросы контроля радиального газораспределения (РГ) занимают важное место в управлении доменной плавкой. Как показывает зарубежный опыт [1–3; 41–43], только за счет его оптимизации расход кокса можно снизить на 10–30 кг/т чугуна. Однако не решен окончательно вопрос о том, что нужно оптимизировать: или форму температурной кривой на колошнике печи, или форму зоны плавления (ЗП) железорудных материалов (ЖРМ) в распаре-заплечиках доменной печи: имеются данные о преобладающем влиянии формы ЗП на распределение газового потока по радиусу печи [1, 4–6; 41, 44–46]. В некоторых работах (например, в [7; 47]) ЗП рассматривается как распределитель газового потока по радиусу печи.

В тоже время, на основании исследований охлаждённых доменных печей, проведенных за рубежом [8–10; 48–50], у некоторых доменщиков оптимальным распределением газа на колошнике печи считается такое, при котором в печи образуется достаточно узкий центральный поток газа, характеризуемый узким температурным пиком в центре печи (до 500–600°С) и довольно низкой и одинаковой температурой (около 100°С), замеренной над уровнем зысыпи [3, 6: 43, 46]. Такое распределение получило название концентрированного центрального потока [11; 51].

В ФРГ были получены данные, согласно которым наилучшие показатели плавки достигнуты при равномерном распределении газового потока по радиусу колошника доменной печи [12; 52], а в Японии — даже при значительном раскрытии периферии на колошнике [2; 42]. Поэтому появился целый ряд работ, в которых полученные результаты плавки связывают не столько с распределением параметров газа по радиусу колошника доменной печи, сколько с формой ЗП. Таким образом, обязательным условием эффективной работы печи является автоматический КРГ на колошнике печи и контроль формы ЗП в распаре-заплечиках печи.

Однако непрерывный автоматический контроль параметров ЗП практически нигде не проводится. Недостаточное внимание уделяется и контролю РГ на колошнике печи, хотя без этого параметра невозможно контролировать форму ЗП. Анализируя состояние вопроса по контроля РГ, можно выделить следующие основные направления его проведения:

- непосредственные измерения параметров газового потока в слое шихты,
- непосредственные измерения параметров газового потока над слоем шихты,
- косвенные способы.

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО ПОТОКА В СЛОЕ ШИХТЫ

В подавляющем числе случаев этот контроль осуществляется периодически (раз в сутки или в смену), проводя ручной отбор проб газа в слое шихты с помощью вводимого в печь отборного устройства. В СНГ только на двух печах НЛМК проводится автоматический отбор и анализ газа по радиусу печи. Внедренные ВНИПИ САУ-20 на ДП-5 и ДП-6 ОАО «НЛМК» системы в течение многих лет действуют в автоматическом режиме с поочередной работой по каждому зонду.

Зарубежные фирмы используют для КРГ в слое шихты мощные гидравлические машины, с применением более стойких зондов, чем их российские аналоги, традиционных газоанализаторов и увеличением времени отбора и анализа. Известна конструкция разработанного фирмой Dango & Dienenthal (Германия) устройства, позволяющего отбирать газ и измерять его температуру по радиусу печи в слое шихтовых материалов. В качестве отборного устройства используется толстостенная труба. Ввод такого отборного устройства в печь осуществляется гидроприводом. Такое устройство было установлено на доменной печи ЧерМК в 1986 г. Однако, по ряду технических и организационных причин это устройство быстро вышло из строя. Подобное устройство фирмы «ТНТ», учреждённой фирмами Dango & Dienenthal и PAUL WURTH, было установлено на одной из печей ОАО «ММК» в 2009 г. Было проведено несколько замеров. В настоящее время устройство не работает. Практически не работают подобные четыре устройства, установленные несколько лет назад на двух доменных печах «Арселор Миттал Темиртау».

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО ПОТОКА НАД СЛОЕМ ШИХТЫ

Задача разработки способа и устройства для непрерывного автоматического контроля РГ в доменной печи была поставлена в 1959 г. в связи с началом работ по созданию комплексной автоматизации доменной печи № 2 НТМК по постановлению Совета министров СССР № 614 от 1958 г. и постоянно решается на протяжении всех последующих лет [13–22; 3–12]. Поскольку на момент постановки работы она была одной из первых в этом направлении, то пришлось провести ряд исследований для решения следующих вопросов:

- выбор места контроля распределения газового потока по радиусу печи (в слое шихтовых материалов или над ним);
- выбор параметра, по которому можно судить о радиальном газораспределении (содержание CO_2 в газе или его температура);
- разработка устройства, с помощью которого можно проводить регулярный автоматический контроль РГ в доменной печи.

Получать информацию о распределении газового потока над слоем шихтовых материалов значительно проще, чем в слое. Но нужно было доказать представительность этой информации. Представительность информации, получаемой над уровнем засыпи, была доказана следующими двумя способами:

- одновременным отбором проб газа в различных точках радиуса колошника в слое шихтовых материалов и над ним, проведенным 1960 году на ДП-4 НТМК [13; 3];
- моделированием движения газового потока в верхней части доменной печи на её плоской гидравлической модели [20; 10].

В первом случае показана подобность кривых изменения концентрации CO_2 в газе на обоих горизонтах печи (рис. 1), а во втором — показано отсутствие смешивания газа, выходящего из столба шихтовых материалов (рис. 2).

После этого нужно было выбрать параметр контроля: температура газа или его состав. Контролировать температуру газа значительно проще, чем его состав. Одновременным отбором проб газа в слое шихты и измерением его температуры над ним, проведенными нами на доменных печах ММК и НТМК, показана «зеркальность» кривых изменения содержания CO_2 в газе по радиусу печи, отобранного в слое шихты, и его температуры, измеренной над уровнем засыпи (рис. 3). Этот вывод подтвержден данными, полученными на доменной печи в ТИБО (Япония) (рис. 3, кривые 1). Проведенными исследованиями было доказано, что контролировать радиальное газораспределение в доменной печи можно по данным о распределения температуры газа по радиусу колошника над уровнем засыпи.

Значительное место в исследованиях заняли разработка и испытание конструкции радиальной многоточечной термопары (РМТ), которую можно было бы установить над уровнем засыпи стационарно. В результате промышленной эксплуатации на доменных печах НТМК, ММК, КарМК, ЧелМК и «Тулачермет» [13–22; 3–11] различных вариантов конструкции РМТ было доказано, что наиболее простой в изготовлении и надежной в эксплуатации является конструкция в виде пучка трубок, устанавливаемого стационарно над уровнем засыпи и защищенного сверху от воздействия ссыпающихся с большого конуса шихтовых материалов специальным защитным чехлом (рис. 4). Такая конструкция в 1982 г. была защищена Авторским свидетельством СССР на изобретение [16; 6].

В странах дальнего зарубежья (Германия, Франция, Финляндия, Австралия, Австрия, Япония, Китай, Индия, и т.д.) предложенный и обоснованный способ контроля радиального газораспределения нашел в последнее время широкое распространение.

В СССР, а теперь в СНГ, также предпринимались и предпринимаются попытки внедрения устройств подобного типа в доменных печах другими специалистами. Однако нашим последователям не пришлось решать те вопросы, которые стояли перед нами при разработке способа и устройства для контроля РГ. Они сосредоточили свои усилия на разработке конструкции термозондов для увеличения срока их службы. Стали применять, в отличие о нас, охлаждение несущей конструкции термозонда водой или азотом, считая, что это удлинит срок его службы. Мы в своих конструкциях никогда не использовали охлаждение, считая, что это искажает показания термопар и сведёт на «нет» все результаты работы. Всего нами было испытано пять принципиально различных конструкций термозондов, две из которых защищены Авторскими свидетельствами СССР (№№ 1016363 и 1445201).

Появившиеся в последнее время на рынке СНГ предложения фирм «ТНТ» (Германия – Люксембург), ООО «Линкор» (бывшая «Стенд», Украина, г. Донецк), Физико – энергетический институт (ФЭИ, Россия, г. Обниск) обладают существенным недостатком – искажение показаний термопар из-за охлаждения несущей конструкции радиальной балки или водой, или азотом. Это не позволяет получать достоверную информацию о распределении газового потока по радиусу печи [20, 22; 12].

Следует отметить, что рассмотренные предложения имеют следующие недостатки:

- охлаждение несущей конструкции РМТ (например, азотом) приводит к искажению показаний термопар. Поэтому их показания могут не корреспондироваться с данными о распределении содержания CO_2 в газе в слое шихтовых материалов;
- используемая конструкция не позволяет заменить ее в случае выхода из строя на небольшой остановке печи (сделать это можно только на ремонте печи II разряда).

Учитывая сказанное, на ОАО «ММК» в 2006 г. приняли решение устанавливать РМТ конструкции ООО «АКОММ» на всех доменных печах комбината, оснащаемых БЗУ фирмы PAUL WURTH. Для этого

несколько изменили конструкцию РМТ [21; 11], сохранив заложенный в самом начале работ принцип: стационарный защитный кожух (продлив его до оси печи) и заменяемый пучок трубок (рис. 5). РМТ эксплуатируются по 5–6 лет. Необходимо отметить, что в последних конструкциях ширина кожуха не превышает 150 мм, что уменьшает влияние его на ссыпающийся с лотка поток шихтовых материалов. На рис. 6 представлена среднесуточная кривая распределения температуры газа по диаметру колошника ДП-2 ОАО «ММК». В настоящее время на пяти доменных печей ММК, на которых установлены БЗУ, эксплуатируются по две РМТ.

В 2010 г. на ДП-1 ОАО «Косогорский металлургический завод», также оборудованной БЗУ, установлены две РМТ, изготовленных ООО «АКОММ». РМТ эксплуатировались весь период работы печи. В 2015 г. при ремонте печи установлены две новые РМТ.

Установка на печи какого-либо устройства для контроля распределения температуры газа по радиусу печи может быть неэффективной из-за ошибок в конструкции и в месте установки устройства, в выборе принципа распределения точек измерения по радиусу колошника, а, главное, из-за отсутствия основной цели данной работы — определение и достижение ОРГ.

Таким образом, учитывая длительный опыт эксплуатации предложенной нами конструкция РМТ на доменных печах с двухконусным засыпным аппаратом и оборудованных БЗУ, можно заключить, что она имеет следующие преимущества по сравнению с конструкциями, разработанными другими авторами в последнее время:

- отсутствие охлаждения несущей конструкции, вызывающего искажение показаний термопар;
- минимальное обслуживания РМТ в течение всего срока ее эксплуатации;
- длительный срок службы РМТ: до 5–6 лет;

Наши исследования показали также, что большое значение для срока службы и получения представительной информации о РГ имеют следующие факторы:

- место (в цилиндрической части защитных плит колошника или в скошенном ряду их) и способ (горизонтально или под наклоном) установки устройства;
- расстояние, на каком устройство установлено от уровня засыпи;
- выбранный принцип распределения точек измерения по радиусу колошника и т.д.

Основные отличия предлагаемой конструкции РМТ и её установки на печи следующие:

- отсутствие перемешивания газа, выходящего из шихты, определило место и способ установки РМТ. Поскольку не было необходимости (для уменьшения перемешивания газового пока) приближать установку РМТ максимально к слою шихты и даже устанавливать её под наклоном (повторяя угол наклона поверхности шихты), выбор места и способа установки РМТ определялись простотой решения этого вопроса и сохранением целостности защитных плит колошника (ЗПК). Поэтому установка РМТ проводится горизонтально над ЗПК (через его скошенный ряд). Это удлиняет срок её службы;
- предложения других фирм («ТНТ» (Германия — Люксембург), «SiemensVAI» (Германия — Австрия), «Линкор», Украина и др.), обладают существенным недостатком — искажение показаний термопар из-за охлаждения несущей конструкции термозонда или водой, или азотом, используемых для увеличения сроков службы термозондов. Охлаждение не позволяет получать достоверную информацию о радиальном газораспределении (РГР). Разработанные нами и испытанные на доменных печах НТМК, ММК, КарМК, ЧелМК и Тулачермет РМТ являются неохлаждаемыми, что обеспечивает получение достоверной информации о РГР;
- отсутствие охлаждения предъявило высокие требования к стойкости конструкции РМТ под воздействием ссыпающихся шихтовых материалов. Всего было испытано пять принципиально различных конструкций термозондов, две из которых защищены Авторскими свидетельствами СССР на изобретение (№№ 1016363 и 1445201);
- принято, что, в целях удешевления контроля РГР, на печи достаточно установки двух (а не четырёх, как предлагают другие фирмы) РМТ, в каждой из которых достаточно размещения шести (а не восьми) термопар. Спаи пяти первых, считая от ЗПК, размещаются в центре пяти равновеликих по площади колец, на которые разбивается площадь колошника. Шестая точка размещается на оси печи. Принятые решения упростили в дальнейшем использовать показания РМТ

для определения параметров зоны плавления с помощью двумерной математической модели, реализованной в составе АСУ ТП ДП-2 и ДП-10 ОАО «ММК».

Важным преимуществом проводимой нами работы — это возможность непрерывной количественной оценки РГ, сопоставление найденного параметра с параметром оценки использования газового потока в доменной печи с целью определения оптимального радиального распределения (ОРГ), при котором достигается максимальное использование восстановительной энергии газового потока, и выработки рекомендаций, направленных на его достижение [14, 15, 18–22; 4, 5, 8–13].

Количественная оценка РГР на колошнике и параметров, характеризующих форму ЗП в заплечиках печи [23; 13], позволяет одновременно сравнить влияние этих факторов на конечные показатели плавки и выбирать параметр и место для дальнейшего контроля и управления РГР.

В качестве параметра количественной оценки РГР на колошнике печи принят коэффициент радиальной неравномерности КР, представляющий собой отношение температур в равных (по площади) «периферийной» и «центральной» частях колошника. Причем площадь колошника делится на две равные части («периферийную» и «центральную») по третьей точке РМТ. В качестве параметров количественной оценки формы ЗП приняты углы наклона линии плавления ЖРМ от «корня» к стенке и к оси печи [23; 13]. Результаты сравнения влияния параметра количественной оценки РГР на колошнике и параметров количественной оценки формы ЗП в распаре — заплечиках печи на показатели плавки, характеризующие производительность печи, нагрев печи и степень использования восстановительной способности газового потока в печи, показали большее влияние на показатели плавки радиального распределения в заплечиках печи, чем на колошнике.

Установка на печи какого-либо устройства для контроля распределения температуры газа по радиусу печи может быть неэффективной из-за ошибок в конструкции и в месте установки устройства, в выборе принципа распределения точек измерения по радиусу колошника, а, главное, из-за отсутствия основной цели данной работы — определение и достижение ОРГ.

КОСВЕННЫЕ СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КОЛОШНИКОВОГО ГАЗА

Одновременно с прямыми измерениями температуры и состава газа по радиусу печи в слое и над слоем шихты длительное время проводятся, особенно за рубежом, работы по разработке и установке на доменных печах систем для косвенного измерения температуры выходящего из слоя шихты колошникового газа.

На вновь вводимых доменных печах «Криворожстали», НЛМК и ЧерМК длительное время назад устанавливались инфракрасные системы «Спиротерм». После некоторого периода эксплуатации эти системы выводились из эксплуатации из-за недостоверности информации о распределении температуры газа вследствие того, было неизвестно, что измеряют эти системы: температуру газа или поверхности шихты.

Эту же перспективу ожидают предлагаемые фирмой «TMT» систему «COMA» для акустического измерения температуры газа над поверхностью. По заявлению представителей фирмы система позволяет получать распределение «действительной» температуры газа одновременно по нескольким диаметрам печи. Для этого «каждый из восьми приёмников, установленных по окружности купола печи, работает как приёмник и как передатчик. Каждый приёмодатчик производит звуковой сигнал, который регистрируется по очереди другими приёмодатчиками. Скорость звука прямо пропорциональна действительной температуре газа. Процессор вычисляет действительные температуры газа на отрезки пути между приёмодатчиками после каждой подачи звукового сигнала». Из изложенного возникает вопрос, как вычисляются температуры в различных точках диаметра печи, если в работе [13], в которой описан данный способ измерения, указано, что «по времени прохождения звука между передатчиком и приёмником рассчитывается интегральное среднее значение температуры вдоль тракта известной длины», т.е. вдоль диаметра колошника. По-видимому, по этой причине результаты измерения температуры газа по диаметру печи с помощью системы COMA вызывают большие вопросы: постоянство значений температур по всем диаметрам печи и по длине одного диаметра печи. (рис. 7). В этой работе указано

о другом назначении предлагаемого способа термоакустики: «звуковую пирометрию начале использовать с 1980-х годов в основном на электростанциях и мусоросжигательных заводах для контроля критических параметров горения и местоположения очага горения». В работе также указывается, что на доменных печах «посредством новой измерительной техники можно заранее распознавать горячие места на поверхности загрузки и, следовательно, целенаправленно обеспечивать ее заполнение шихтой. Это позволит предотвратить образование прорывов в шихтовом столбе». Подобную функцию выполняет и разработанная в КНР система «СИСОП» и установленная на ряде доменных печей ОАО «ММК». Заявленную разработчиками «СИСОП» функцию КРГ использовать не возможно из-за значительной разницы определяемых температур с помощью СИСОП и РМТ, разработанных ООО «АКОММ».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Важность непрерывного автоматического контроля радиального газораспределения (РГ) на колошнике печи возрастает в связи с установкой на печах БЗУ и необходимостью (в связи со снижением стойкости кладки и холодильников печи) организации непрерывного контроля параметров зоны плавления (ЗП).
2. Анализ работ, направленных на организацию контроля РГ, показал, что в большей степени этому направлению соответствуют работы, направленные на разработку радиальных многоточечных термопар, устанавливаемых стационарно над уровнем засыпи. Экспериментальными исследованиями на доменной печи, отбирая одновременно газ в слое и над слоем шихты, показано отсутствие смешивания газа, выходящего из слоя шихты. Эти данные были подтверждены исследованиями на плоском гидравлическом лотке верхней части печи. Одновременным отбором проб газа в слое шихты и измерением его температуры над слоем показана «зеркальность» кривых. Это явилось основанием для использования температуры газа для контроля РГ. Предложенные конструкции РМТ увеличили срок их службы до 5–6 лет. На пяти доменных печах ОАО «ММК», оборудованных БЗУ, РМТ конструкции ООО «АКОММ» используются последние 10 лет.
3. Предлагаемые косвенные способы контроля РГ недостаточно обоснованы.
4. Предложенные и обоснованные многочисленными экспериментами и длительным периодом эксплуатации способ и устройство контроля РГ на колошнике нашли в настоящее время широкое распространение в мире , что говорит о правильности выбранного в 1959 г. направления работ и о том, что этот способ остаётся единственным, который обеспечить получение достоверной информации о РГ на колошнике доменной печи.
5. Предлагаемые косвенные способы контроля РГ (недостаточно обоснованы

Список литературы

1. Гуденау Г.В., Крайбих Л., Номия Ё. Влияние пластичной зоны на проницаемость столба шихты в доменной печи. – Черные металлы, 1980, № 25/26, с. 7–14.
2. Кутнер С.М. Эксплуатация доменных печей, оборудованных под вижными плитами, за рубежом. — М., 1981. — 40 с. — (Обзорная информ / Ин-т «Черметнинформация». Сер. Производство чугуна; Вып.1).
3. Курунов И.Ф. Совершенствование технологии и управления доменной плавкой за рубежом. — Черная металлургия, 1981, № 18 (892), с. 18–35.
4. Изменение высоты зоны плавления в зависимости от теплового состояния доменной печи / Есия Судзуки и др.; Тэцу то хаганэ, 1975, т.61, № 4, с. 23.
5. Гуденау Г. В., Крайбих К., Номия Е. Влияние пластичной зоны на распределение газового потока в доменной печи // Черные металлы. 1979. № 22. С. 7–13.
6. Хосидэ Й., Такаги С., Юномура А. Совершенствование технологии доменной плавки в Японии // Черные металлы. 1980. № 25/26. С. 3–7. 20.

7. Г.В. Гуденау, К. Крайбих, Н. Иошитака. Зоны когезии и размягчения как распределители газовых потоков в доменной печи. «Черные металлы», 1979, 99, № 22, с. 1204–1211.
8. Исследования, проведённые на остановленной доменной печи № 2 завода в Кокуре / Сасаки К., Хатано М. и др.; «Тэцу то хаганэ», 1976, т. 62, № 5, с. 580–591.
9. Исследование внутреннего состояния остановленных и охлаждённых доменных печей (сообщение 1) / Санбара К. и др.; «Тэцу то хаганэ», 1976, т. 62, № 5, с. 535–546.
10. Изменение состояния шихтовых материалов в шахте доменных печей. Исследования, проведённые на остановленных и охлаждённых доменных печах (сообщение 2) / Симомура Я. и др.; «Тэцу то хаганэ», 1976, т. 62, № 5, с. 547–558.
11. Системы с термокамерой фирмы NKKдля верхней части домны и её применение при работе домны / Идзука м. и др. Iron-making Proceeding, 1979, p. 31.
12. Гришкова А.А, Френкель М.М., Вегман Е.Ф. Управление загрузкой доменных печей — М., 1981, — 28 с. — (Обзорная информация / Ин-т «Черметинформация». Сер. Автоматизация металлургического производства; Вып. 4).
13. В.М. Паршаков, Бабушкин, В.Н. Тимофеев. Разработка метода контроля распределения газового потока по радиусу печи. «Теплотехника доменного и агломерационного процессов». М: «Металлургия». 1966, с. 292–305.
14. В.М. Паршаков, Н.М. Бабушкин, Б.А. Боковиков. Испытание метода контроля распределения газового потока по радиусу доменной печи. «Тепло- и массообмен в слое и каналах, теплотехника доменных и теплообменных аппаратах». М: «Металлургия», 1970, с. 109–119.
15. В.М. Паршаков, Н.М. Бабушкин, Б.А. Боковиков и др. Количество и распределение газового потока в доменной печи и его влияние на показатели плавки. «Сталь», 1971, № 12, с. 1069–1074.
16. В.М. Паршаков и др. Устройство для контроля распределения температуры газа по радиусу колошника доменной печи. Авторское свидетельство СССР №1016363. «Открытия. Изобретения», 1983, № 17, с. 12.
17. В.М. Паршаков и др. Устройство для контроля распределения температуры газа по радиусу колошника доменной печи. Авторское свидетельство СССР № 1445201, 1984 г.
18. В.М. Паршаков и др. Непрерывный контроль радиального газораспределения в доменных печах. «Сталь», 1988, № 12, с. 15–18.
19. В.А. Заболотский, В.М. Паршаков, В.Б. Иванов, А.В. Денисов. Непрерывный контроль газового потока в доменной печи №3 ЧМК. «Сталь» 1990, №6, с. 14–16.
20. В.М. Паршаков. Автоматизированная система оптимизации доменной плавки. «Сталь», 2004, № 3, с. 7–13.
21. В.М. Паршаков, Р.С. Тахаутдинов, Ю.А. Бодяев и др. Контроль радиального газораспределения в оборудованных БЗУ доменных печах ММК с помощью многоточечных термозондов. «Сталь», 2009, № 10, с. 16–19.
22. В.М. Паршаков, А.А. Чевычелов, А.А. Полинов и др. Внедрение непрерывного автоматического контроля радиального газораспределения в доменных печах. Труды VI международного контроля по агло-коксо-доменным производствам. Ялта, 2013. с. 358–375.
23. В.М. Паршаков, А.А. Полинов, А.В. Павлов и др. Непрерывный автоматический контроль, количественная оценка и оптимизация параметров зоны плавления с помощью двумерной математической модели, учитывающей процессы по высоте и сечению доменной печи от уровня засыпи до чугунной летки. Доклад в настоящем сборнике.
24. Х.-П. Домельс, М. Дойстер, Ф. Райнитцхубер. Акустическое измерение температуры на колошнике доменной печи. «Черные металлы», июль 2009, с. 19–24.

В.М. Паршаков, ООО «АКОММ»,
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
А.А. Полинов, А.В. Павлов, И.Е. Прохоров,
А.В. Колосов, П.Ю. Довженко, ОАО «ММК»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ЗА СЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЫЩЕНИЯ АСУ ТП ДОМЕННОЙ ПЕЧИ (на примере внедрения на доменных печах ОАО «ММК»)

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы во время ремонтов и реконструкций доменных печей проводится модернизация технических средств сбора, обработки и представления информации. Современные устройства автоматического контроля заменили устаревшие датчики с ферродинамическими и струнными преобразователями, многократно увеличилась мощность и надежность средств вычислительной техники и коммуникаций, существенно изменились терминальные устройства отображения технологической информации.

Однако созданные при этом «автоматизированные системы управления технологическими процессами» (АСУ ТП) доменных печей не соответствуют своему названию, т.к. не «управляют технологическими процессами». Они мало помогают доменщикам в управлении плавкой и в части выдачи рекомендаций, направленных на повышение её эффективности. Фактически на доменных печах СНГ созданы базовые автоматизации (БА, нижние уровни АСУ ТП). Только присоединив к ним верхний уровень (ВУ, математическое моделирование), можно решать технологические задачи управления плавкой.

В докладе представлены результаты проводимой с 2006 г. в доменном цехе ОАО «ММК» работы по технологическому насыщению соз-

данных АСУ ТП доменных печей за счет поэтапного внедрения автоматизированной системы контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки (АСКОП ДП). Приступая к работе, были выполнены следующие мероприятия: проанализированы результаты комплексных исследований, проведенных на ММК с 1978 по 1986 гг. [1]; определены системы, с которых надо начинать работу и которые могут дать эффект от внедрения [2]; определены меры по совершенствованию управления доменной плавкой с помощью математического моделирования, которые надо провести для эффективного внедрения ПУТ [3]; сформировали подход к технологическому насыщению создаваемых и созданных АСУ ТП доменных печей [4]. Перечень локальных систем, входящих в АСКОП ДП, и этапы их внедрения представлены в таблице 1. Результаты их внедрения представлены в работах [5–11].

Таблица 1. Автоматизированная система контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки (АСКОП ДП), внедрённая на доменных печах ОАО «ММК»

Наименование групп систем	Наименование локальных систем	№ печи на ММК	Год внедрения на ММК	Рекомендуемые этапы внедрения
1	2	3	4	5
1. КОНТРОЛЬ:	1.1) радиального газораспределения на колошнике	2, 4, 6, 9, 10	2006	1
	1.2) окружного газораспределения на колошнике	2, 10	2011	2
	1.3) окружного газораспределения в горне (температуры каждого фурменного очага)	2	2011	2
	1.4) материального и теплового балансов плавки	2	2013	3
	1.5) нагрева горна	все печи	2008	1
	1.6) режима работы БЗУ	2,10	2010	2
2. ОПТИМИЗАЦИЯ:	2.1) газодинамического режима плавки	все печи	2008	1
	2.2) радиального распределения	2, 4, 6, 9, 10	2011	1
	2.3) окружного газораспределения на колошнике	2, 10	2011	2
	2.4) окружного газораспределения в горне печи (температуры фурменных очагов)	2	2011	2
	2.5) восстановительных процессов плавки (минимальный расход кокса)	2	2013	3
	2.6) теплового состояния печи	все печи	2009	1
	2.7) параметров зоны плавления	2	2014	1
3. ПРОГНОЗ:	3.1) содержания кремния в чугуне	2	2011	3

Примечание. Цифры в колонке 5 соответствуют рекомендуемым этапам внедрения.

2. ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Особенностями проведения работы являются:
- поэтапное внедрение локальных систем АСКОП ДП;
- подключение систем к созданным АСУ ТП с использованием их технических средств;
- одновременное внедрение некоторых систем на всех печах цеха благодаря разработанным на комбинате интеграционным комплексам АСУ ТП и интерфейсу передачи данных, которые позволяют после передачи на комбинат разработанных программных продуктов и установки их на одном из серверов вычислительного центра доменного цеха подключать к ним любую доменную печь и проводить расчеты по каждой из разрабатываемых систем сразу для всех печей цеха;
- передача результатов расчетов из систем на АРМы мастеров всех печей и руководителей цеха;

- функционирование разрабатываемых систем в режиме on line с автоматической выдачей рекомендаций по управлению доменной плавкой;
- использование опыта создания АСУ ТП доменных печей и их ВУ в СССР, СНГ и за рубежом, полученного во время работы во ВНИПИ САУ (г. Москва), в фирме Сименс (Германия) и во вновь созданной в 1992 г. фирме АКОММ (г. Москва).

3. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА АСКОП ДП

АСКОП ДП построена с использованием многозвенной клиент-серверной архитектуры (СУБД — сервер приложений (WEB-сервер) — клиент (WEB-браузер)).

СУБД построена на базе Microsoft SQL Server 2005 Standard Edition. В рамках СУБД реализован автоматический сбор необходимых входных данных, некоторые этапы расчёта по математической модели и хранение выходных данных. Расчётная часть реализована с использованием хранимых процедур СУБД на языке TSQL. Все корректировки в расчёты вносятся, не требуя остановки системы. Наиболее требовательные ко времени предоставления результата расчётные модули реализованы на WEB-сервере.

Клиентская часть представляет собой любой WEB-браузер клиентского ПК, подключенного к корпоративной сети предприятия.

Аппаратная часть представляет собой сервер HP Proliant ML370 G4 общий для СУБД и WEB-сервера.

4. СБОР И ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Контроль достоверности каждого параметра АСУ ТП, используемого моделью, осуществляться несколькими базовыми проверками значений параметров. Такими, как:

Проверка взаимосвязей определённых параметров. Для некоторых взаимосвязанных параметров технологическим персоналом задаются значения коэффициентов проверочных функций. При отрицательном результате какой-либо из проверок, система выдаёт сообщение, содержащее наименование параметра и функцию, по которой не прошла проверка. Это сообщение передаётся соответствующим службам для поиска и устранения неисправности.

Сравнение значений одних и тех же параметров, полученных как из АСУ ТП, так и из систем ручного ввода. Для некоторых параметров (химия колошникового газа, содержание кислорода в дутье) присутствует два вида источников информации: приборы автоматического газоанализа и ручной пробоотбор с последующим анализом в лаборатории. При превышении определённого порога различия значений, система выдаёт сообщение, содержащее наименование параметра и предлагает технологу определить источник сигнала для математической модели. Также это сообщение передаётся соответствующим службам для поиска и устранения возможной неисправности.

Реализация проверок данных АСУ ТП, поступающих в реальном времени, позволяет повысить оперативность реагирования персонала, отвечающего за обслуживание АСУ ТП доменного цеха, на возникающие ошибки в данных и устранять их в рабочем порядке. Также появляется возможность отсекать некорректные данные от входного потока математической модели и блокировать выдачу неправильных рекомендаций технологическому персоналу цеха.

5. ГРУППА СИСТЕМ «КОНТРОЛЬ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ»

Задачи, решаемые в этой группе систем, имеют как самостоятельное значение, так и используются в расчетах в группах систем «Оптимизация плавки» и «Прогноз плавки».

5.1. Контроль радиального газораспределения

Для контроля радиального газораспределения (РГ) (рис. 1) на печах, оборудованных БЗУ, используется показания:

- предложенных ООО «АКОММ» [12–14] стационарных радиальных многоточечных термопар (РМТ) (рис. 2). По запросу пользователя на экранах видеотерминалов на печах № 2, 4, 6, 9 и 10 выводятся средние кривые за последние «выпуск» (период работы печи от закрытия до закрытия чугунной лётки на смежных выпусках), смену, сутки и неделя для всех печей, на которых установлены РМТ;
- предложенных ООО «АКОММ» периферийных термопар над уровнем засыпи (ПТН), спаи которых расположены на том же расстоянии от защитных плит колошника (ЗПК), что и первые точки РМТ;
- термопар в газоотводах печи (ТГП).

Наиболее сложная задача — разработка конструкции РМТ. Этапы решения этого вопроса представлены в докладе [15].

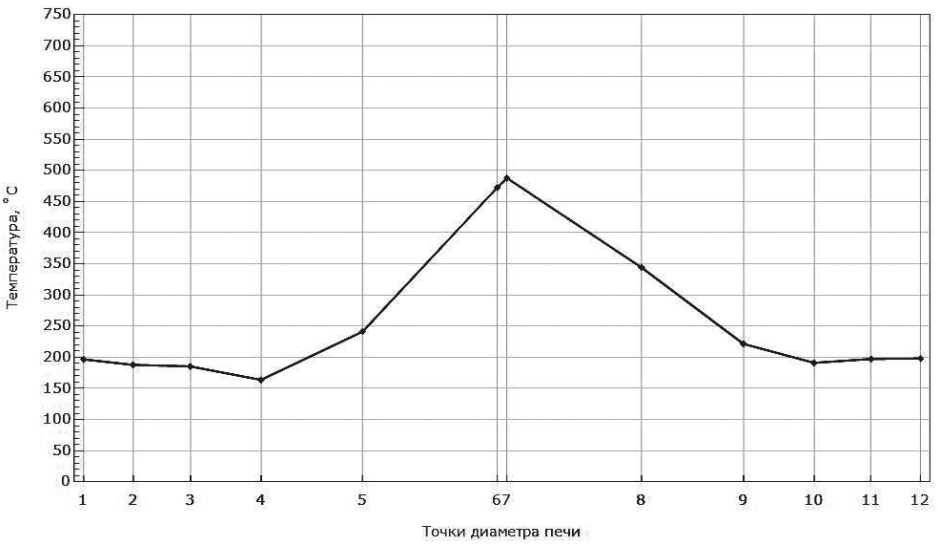


Рис. 1. Распределение температуры газа по радиусу ДП6 за сутки (15.05.2016 00:00 – 16.05.2016 00:00)

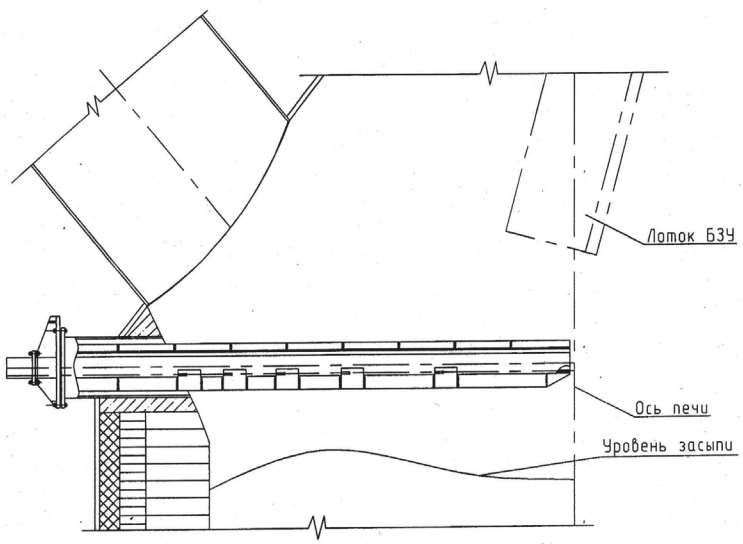


Рис. 2

5.2. Контроль окружного газораспределения на колошнике печи

Недостаточная эффективность контроля окружного газораспределения объясняется следующими причинами:

- внизу печи — из-за отсутствия надёжных средств контроля распределения дутья по фурмам и температуры газа в каждом фурменном очаге;
- вверху печи — из-за того, что при контроле распределения температуры газа по окружности колошника с использованием периферийных термопар, установленных под защитными плитами колошника (ЗПК), невозможно оценить насколько равномерно распределяет шихту по окружности колошника используемый засыпной аппарат.

Роль контроля окружного распределения шихты особенно возросла в связи с внедрением БЗУ лоткового типа. Объясняется это следующими причинами:

- невозможностью контроля «замыкания колец» шихты при попадании её на поверхность ранее загруженной шихты [16];
- сложным механизмом истечения материалов из бункера БЗУ при загрузке в него двух и более видов шихты, отличающихся по гранулометрическому составу и насыпному весу [17].

В дополнение к периферийным термопарам под ЗПК (ПТП) и к термопарам в газоотводах печи (ТГП) на пяти печах, на которых установлены БЗУ, были установлены по 4–8 штук ПТН. Из рис. 3 видно одинаковое понижение показаний ПТН после выгрузки железорудной части шихты. Это свидетельствует о равномерном распределении её по окружности колошника в данном случае.

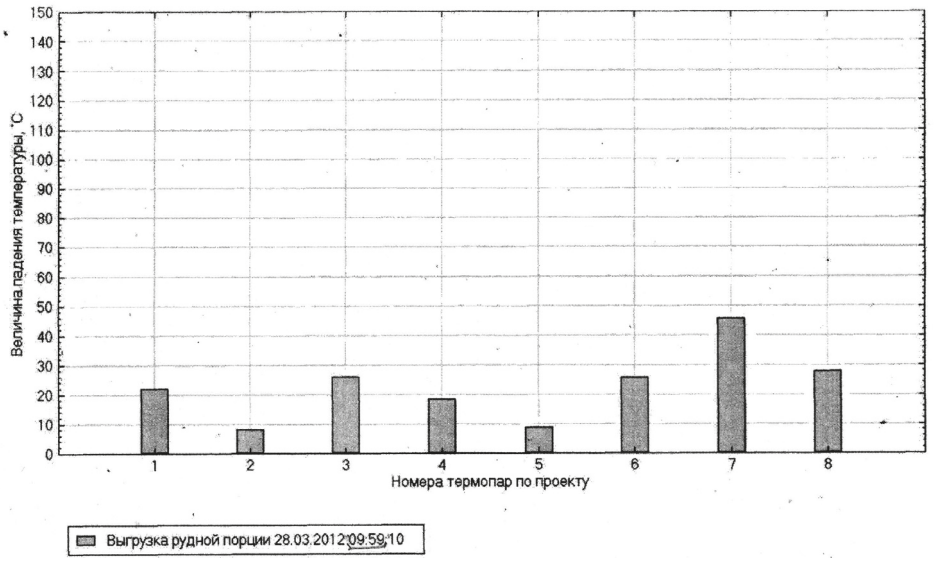


Рис. 3. Температура газа под газоотводами. Абсолютные значения изменений показаний ДП10, не в порядке реакции на выгрузку

5.3. Контроль окружного газораспределения в горне печи

Одной из характеристик фурменного очага, которую можно оценить количественно, является его температура. Однако до настоящего времени контроль температуры фурменных очагов (Тфо) осуществляется визуально по их светимости, которую технологический персонал оценивает периодически через гляделки фурменных приборов. Такой контроль носит субъективный характер. Было принято, что для оперативного контроля Тфо наиболее целесообразно использовать информацию о тепловом воздействии фурменного очага на тело воздушной фурмы [18–19]. Данная задача решена с помощью датчиков теплосъёма, использующих датчики расхода воды на охлаждение воздушных фурм, установленных для контроля их прогара, и разработанной математической модели (ММ) расчета Тфо [19]. Алгоритм расчета позволяет по фактическим параметрам работы печи и данным о количестве тепла, отводимого от дутьевой фурмы с охлаждающей водой, определять температуру фурменного очага. Результаты расчета температур во всех фурменных очагах доменной печи № 2 и тренды их изменения представлены на рис. 4 и рис. 5.

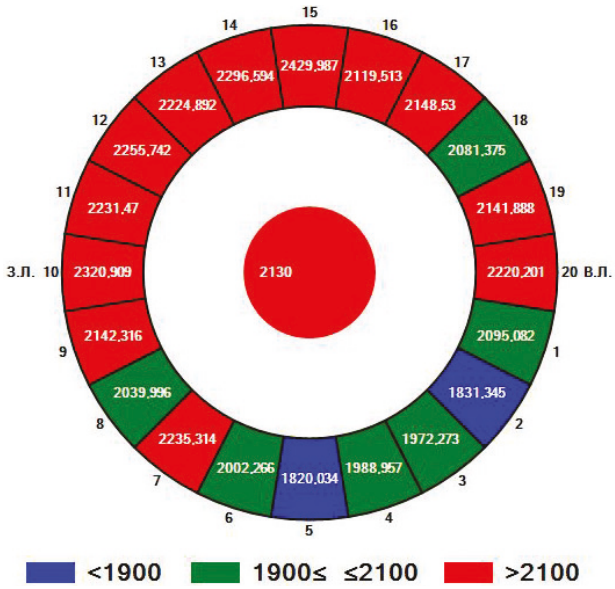


Рис. 4

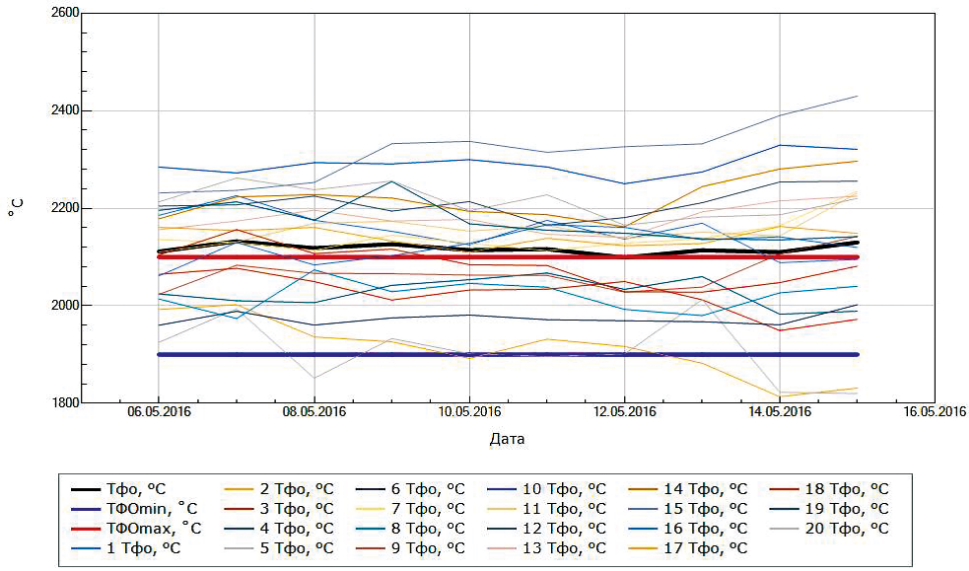


Рис. 5. Тренды температур фурменных очагов ДП2 (сутки) с 06.05.2016 по 16.05.2016

5.4. Контроль материального и теплового балансов плавки

Система предназначена для оперативного, в темпе с процессом расчета материального и теплового балансов (МТБ) плавки. Цель проведения расчетов МТБ (таблицы 2 и 3) — использование величины их невязок и некоторых статей балансов для анализа протекания процессов плавки и распознавания их отклонений от нормы на более ранних стадиях их развития. Кроме того, работа системы позволит автоматически проводить диагностику достоверности основных информационных каналов АСУ ТП и своевременно обнаруживать сбои в их функционировании. Это особенно важно для функционирования АСКОП ДП, т.к. локальные системы её работают в режиме on line и формируют конкретные рекомендации по изменению режима работы доменной печи.

Таблица 2. Результаты расчёта материального баланса за сутки (20.09.2015 00:00 – 21.09.2015 00:00) ДП 2

Материальный баланс	(МБ)
Наименование статьи МБ	Значение
Удельный расход агломерата, кг/т	1107,4
Удельный расход окатышей, кг/т	618,7
Удельный расход кокса, кг/т	482,1
Удельный расход дутья (расчётный), кг/т	1394,1
Удельный расход природного газа (фактический), кг/т	91,0
Приходная часть баланса, кг/т	3693,3
Удельный расчётный выход чугуна, кг/т	1000,0
Удельный расчётный выход шлака, кг/т	329,6
Удельный выход сухого колошникового газа (расчётный), кг/т	2232,0
Удельная влага непрямого восстановления, кг/т	106,1
Расходная часть баланса, кг/т	3667,6
Невязка материального баланса, %	0,7

Таблица 3. Результаты расчёта теплового баланса за сутки (20.09.2015 00:00 - 21.09.2015 00:00) ДП 2

№	Наименование статьи МБ	Значение	Процент
1	Количество тепла, вносимого с дутьём, ккал/кг	399,2	39,8
2	Количество тепла от горения углерода кокса, ккал/кг	550,4	54,9
3	Количество тепла от горения природного газа и вносимого природным газом, ккал/кг	52,4	5,2
Приход тепла, ккал/кг		1002,0	100,0
1	Количество тепла на прямое восстановление железа в зоне смешанного восстановления, ккал/кг	230,9	23,0
2	Количество тепла, пошедшее на косвенное восстановление железа в зонах косвенного и смешанного восстановления, ккал/кг	54,8	5,5
3	Общее количество тепла на прямое восстановление примесей чугуна в зоне его доводки, ккал/кг	55,2	5,5
4	Теплосодержание чугуна, ккал/кг	313,4	31,3
5	Теплосодержание шлака, ккал/кг	145,0	14,5
6	Теплосодержание колошникового газа, ккал/кг	91,0	9,1
7	Потери тепла с охлаждающей водой, ккал/кг	167,2	16,7
8	Потери тепла в окружающую среду, ккал/кг	6,7	0,7
Расход тепла, ккал/кг		954,7	95,3
Невязка теплового баланса, ккал/кг		47,3	4,7

Основными принципами расчета МТБ являются:

- для составления МТБ используются данные о шихтовых материалах (кокс, агломерат, добавки, окатыши), жидких продуктов плавки (чугун и шлак) и газообразных составляющих (дутье, природный газ, пар, колошниковый газ), участвующих в выплавке чугуна;
- МТБ составляются для шихтовых материалов, размещающихся в объеме печи; для газообразных составляющих, обрабатывающих данный объем материалов; для жидких продуктов плавки, выплавленных из данных шихтовых материалов;

- расчет проводится автоматически после каждого закрытия выпуска с использованием информации, обновляющейся также после каждого выпуска: новая информация добавляется, старая — забывается. По запросу пользователя на экранах видеотерминалов на печах № 2 и № 10, на которых реализованы эта система, выводятся результаты расчетов за последние «выпуск» (период работы печи от закрытия до закрытия чугунной лётки на смежных выпусках), смену, сутки, неделя и тренды из изменений (рис. 6).

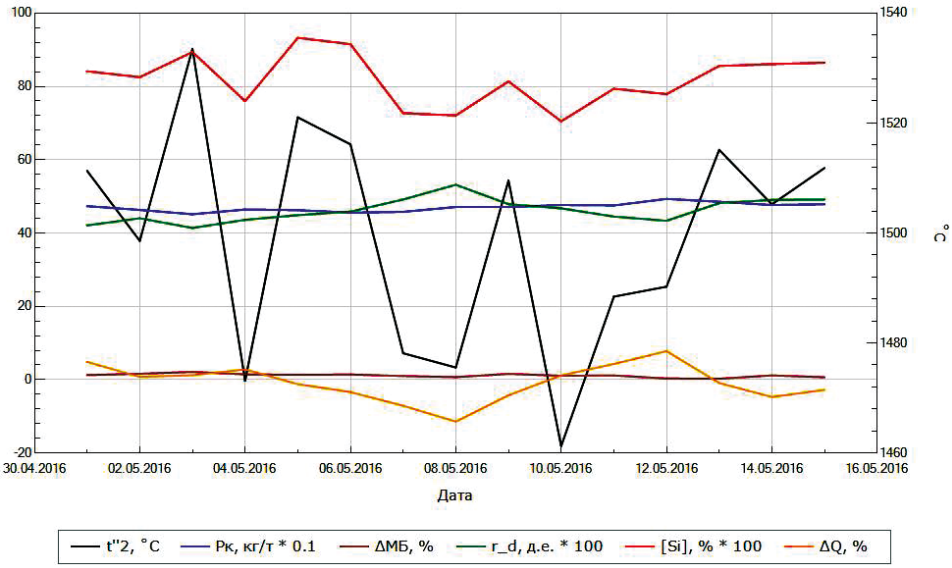


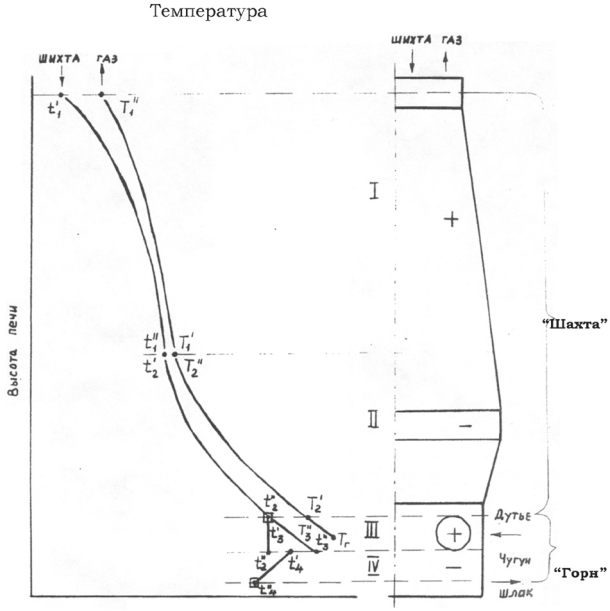
Рис. 6. Тренды параметров МТБ ДП10 (сутки) с 01.05.2016 по 16.05.2016

5.5. Контроль нагрева горна

Для контроля нагрева горна используется математическая модель газодинамических, тепло- и массообменных процессов в двух нижних зонах печи [20–21]: фурменной зоне (зона 3) и зоне окончательного формирования состава и нагрева продуктов плавки (зона 4) (рис. 7).

В модели учитывается: 1) образование и размеры фурменных очагов; 2) горение кокса и его заменителей; 3) прохождение продуктов плавки через фурменные очаги и окисление в них ранее восстановленного железа; 4) распределение выделившегося от окисления железа тепла между продуктами плавки и газами; 5) передача тепла излучением от газов к оболочке фурменных очагов и расплаву; 6) термохимические процессы, протекающие в зоне «доводки», включая вторичное восстановление железа, окислившегося в фурменных очагах, и прямое восстановление примесей чугуна; 7) физические потери тепла, в т.ч. с охлаждающей фурмы водой.

Наиболее сложными для решения были задачи 1), 3), 4) и 5). Для расчета протяженности фурменного очага (Lфо) (задача 1) использовали выражение, представленное в работах [22, 23]. Возможность



□ - критерии теплового состояния доменной печи
I,II,III,IV - зоны теплообмена
+, (-) - процессы идут с выделением (поглощением) тепла

Рис. 7

расчета Lфо, а также решение задач 3) и 4) [24] и 5) [25], позволили определять комплексные параметры (КП), характеризующие процессы в фурменных очагах. В число КП входят: температура продуктов плавки на входе в фурменную зону (t'_3) или, что то же самое, на выходе из «шахты» печи (t''_2), т.к. численно они равны; температура оболочки фурменных очагов ($t_{обол}$); балансовая температура газов в фурменных очагах (T''_3), вступающая в теплообмен с шихтовыми материалами во второй ступени теплообмена и значительно отличающаяся по своей физической сущности от теоретической температуры горения; температура продуктов плавки на выходе из фурменных очагов (t''_3); температура продуктов плавки на входе в зону «доводки» (t'_4). Тренды КП представлены на рис. 8.

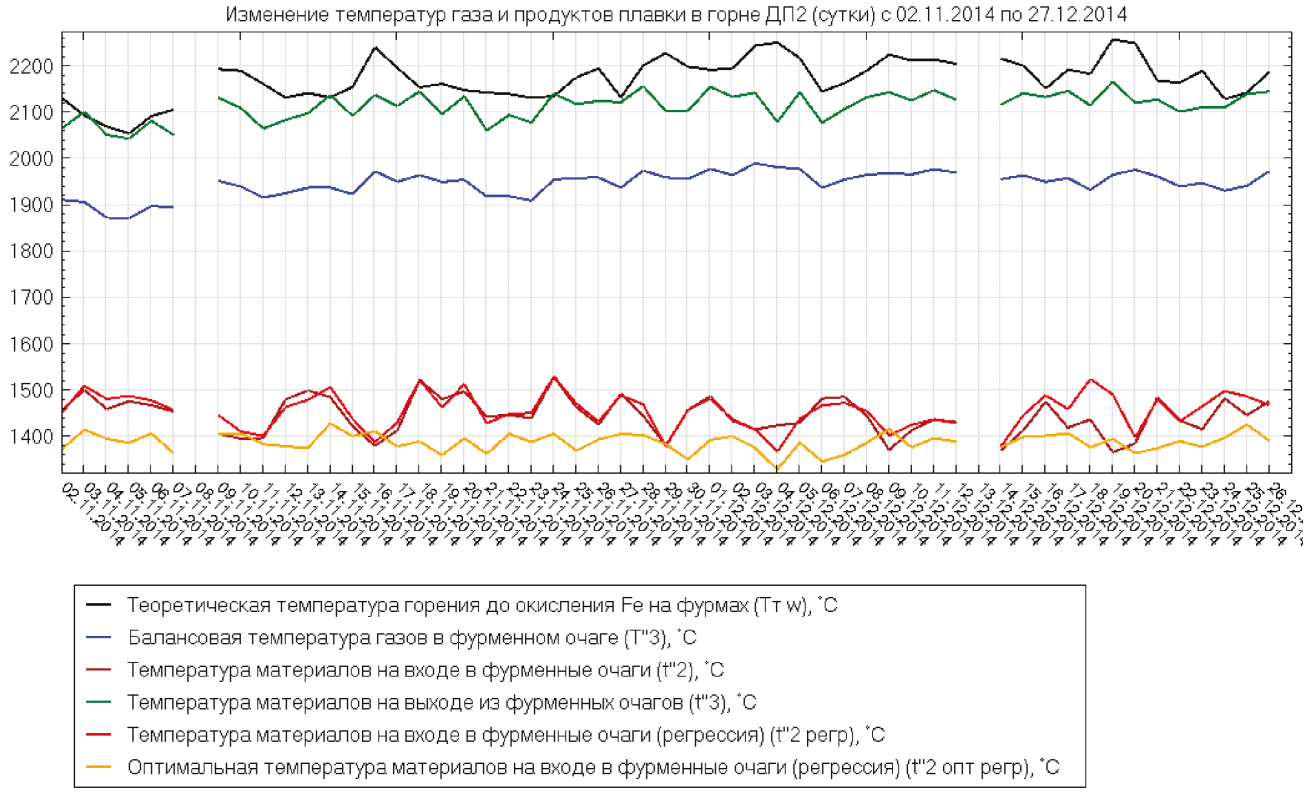


Рис. 8

5.6. Контроль режима работы БЗУ лоткового типа

Указанные в разделах 4.1 и 4.2 датчики (РМТ, ПТН и ТГП) позволяют контролировать радиальное и окружное распределение шихты при применении БЗУ, используя «обратную связь», т.е. контролируя изменение температуры газа в различных точках радиуса и окружности печи после выгрузки шихты из бункера БЗУ.

Анализ показал, что основной особенностью радиального газораспределения на доменных печах, оборудованных БЗУ лоткового типа (по сравнению с печами, оборудованными двухконусными засыпными аппаратами), является значительное его непостоянство, вызванное неконтролируемым изменением распределения шихтовых материалов по радиусу печи. Сложность использования БЗУ лоткового типа в достижении равномерного окружного распределения шихты возникает не только за счет отсутствия замыкания колец. Влияние выгрузки шихты на изменение температуры газа, выходящего из периферийной части печи, изучали путем построения графиков по образцу рис. 3 для ДП-2 и ДП-10. Обращает на себя внимание большие разницы в величинах падения температур в разных точках периферии печи, например, за две последовательные выгрузки порции железорудной шихты (ЖРШ). Так, например, при выгрузке в 10 час. 18 мин. 04.04.2012 ЖРШ распределилась по периферии печи практически равно-

мерно (рис. 9). При предыдующей выгрузке в 10 час. 06 мин., по-видимому, из-за сложного механизма истечения слоёв агломерата и окатышей из бункера БЗУ ЖРШ распределилась (как видно из рис. 10) очень неравномерно. Можно предположить, что в этом случае в районе периферии печи с 3 по 6 точки окатышей сосредоточилось больше, чем агломерата. Такая неравномерность не может не сказаться отрицательно на работе печи.

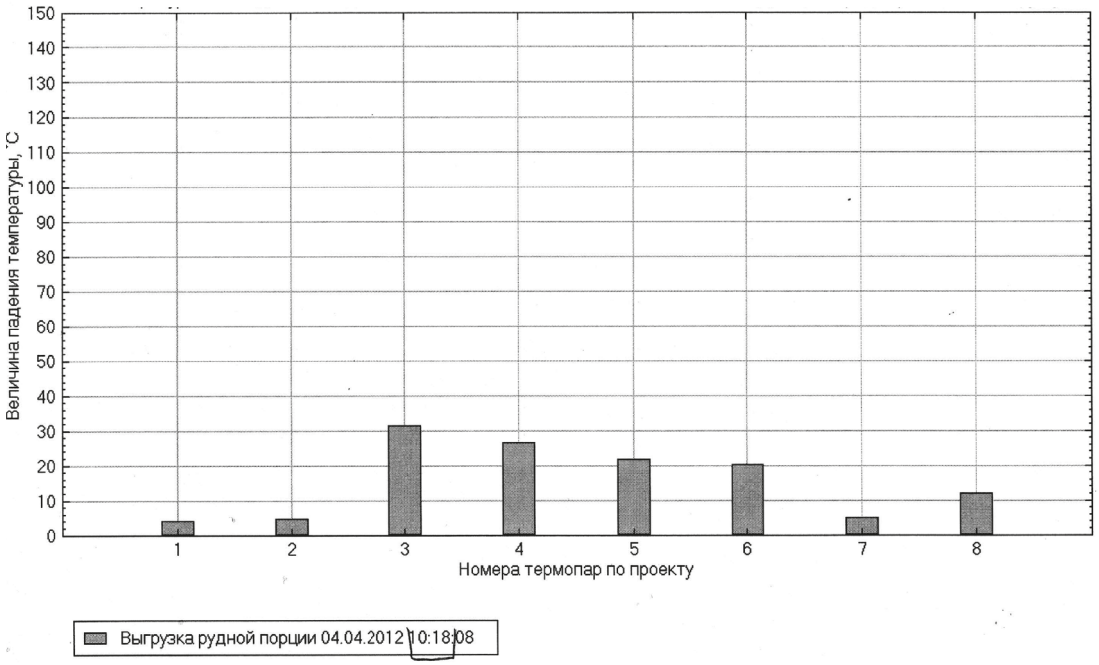


Рис. 9. Температура газа под газоотводами. Абсолютные значения изменений показаний ДП10, не в порядке реакции на выгрузку

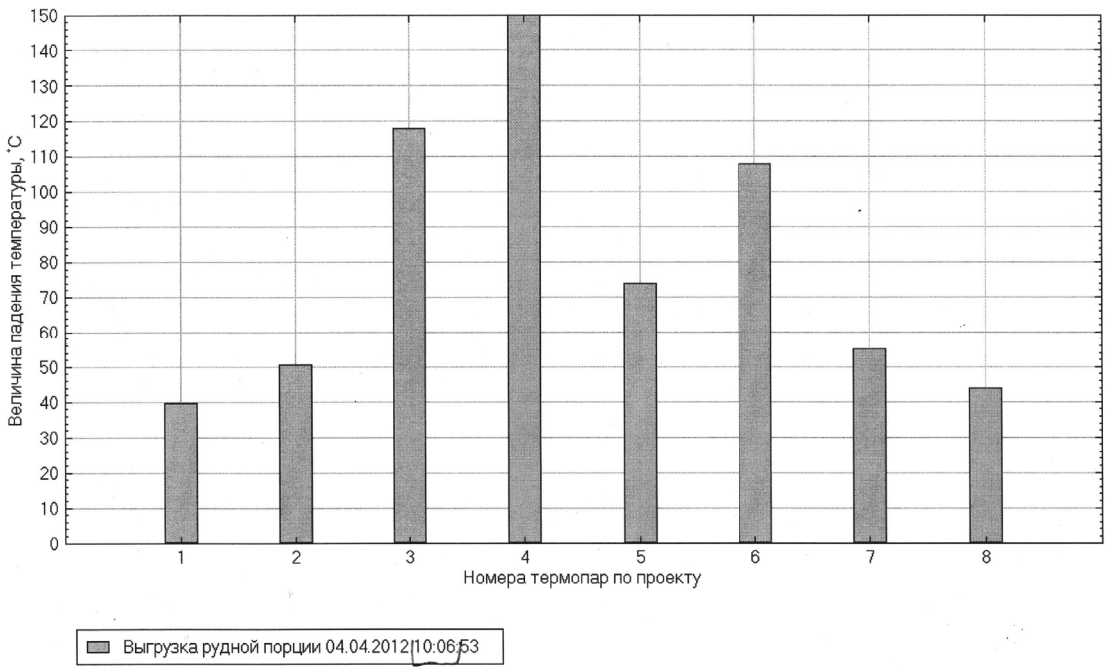


Рис. 10. Температура газа под газоотводами. Абсолютные значения изменений показаний ДП10, не в порядке реакции на выгрузку

Всё это показывает сложность использования БЗУ лоткового типа для достижения заданного радиального и окружного газораспределения. Преимущества такого ЗУ могут стать его недостатками. Заслуживает внимания мнение одного из ведущих специалистов СНГ в вопросах управления загрузкой доменных печей В.А. Доброскока: «Факт установки лоткового БЗУ на доменной печи сам по себе не гарантирует её успешной работы. При отсутствии эффективной технологической концепции его регулирующие возможности используются не полностью. При этом не исключено, что доменные печи, оснащенные иными загрузочными устройствами, работают с сопоставимыми или даже с лучшими показателями, чем доменная печь, оснащенная лотковым» [26].

Для контроля работы БЗУ на ДП-2 и ДП-10 используется программа, которая автоматически контролирует и фиксирует следующие параметры работы БЗУ (рис. 11): вид загружаемых материалов (рудная и коксовая часть), время открытия затвора БЗУ, углы наклона лотка БЗУ при каждой выгрузке шихты.

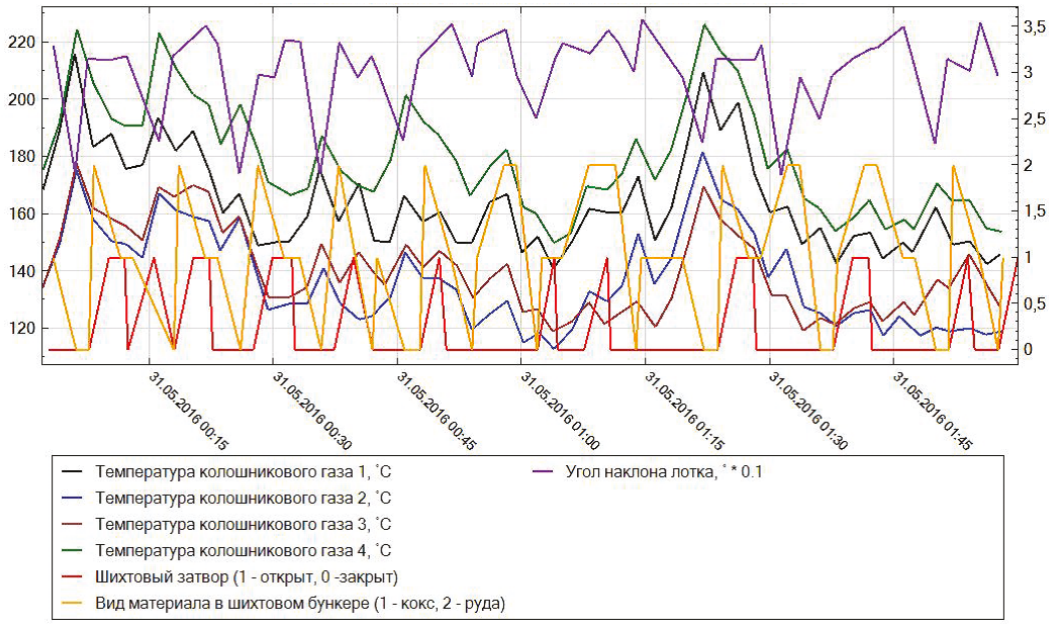


Рис. 11. Температура колошникового газа ДП2 с 31.05.2016 по 31.05.2016 02:00

6. ГРУППА СИСТЕМ «ОПТИМИЗАЦИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ»

Совершенство доменной печи как агрегата для выплавки металла состоит в том, что все основные процессы в ней протекающие (газодинамические, массообменные, теплообменные и плавильные) имеют оптимальное значения и эффективность доменной плавки будет тем выше, чем ближе к оптимальному уровню они приближены. Для решения этой задачи используются пересчетные модели, обеспечившие расчетное восстановление оптимальных режимов.

6.1. Система оптимизации расхода дутья

Система предназначена для определения такого количества подаваемого в доменную печь дутья, при котором образуется оптимальное для данных сырьевых и эксплуатационных условий плавки количество газового потока, проходящего через столб шихтовых материалов без нарушения его устойчивости [13]. При этом критериями оптимизации могут быть: или минимальный расход кокса; или максимальная производительность печи. Выбор критерия оптимизации осуществляется технологическим персоналом цеха, исходя из нужд цеха и требований дальнейшего передела чугуна. Наши экспериментальные и расчётные исследования показали, что для достижения минимального расхода кокса

надо вести доменную плавку на границе исчезновения резервной зоны теплообмена [27], а максимальной производительности печи — на границе дополнительного разрыхления шихты [13]. На рис. 12 представлены, для примера, результаты определения оптимального расхода дутья для ДП-4.

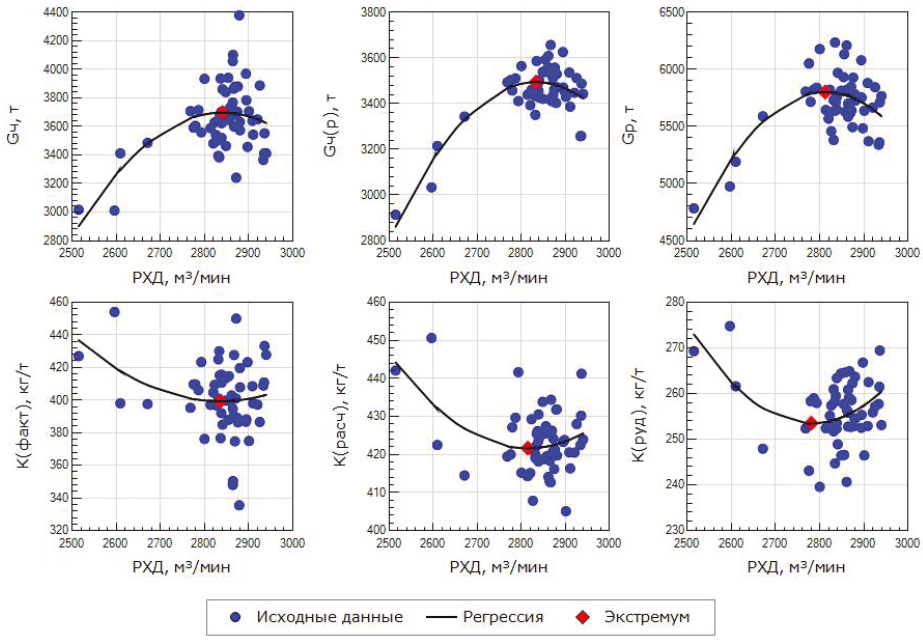


Рис. 12. Зависимость параметров работы ДП1 за сутки с 09.05.2016 по 08.07.2016

6.2. Система оптимизации радиального газораспределения

Вопросы оптимизации радиального газораспределения занимают важное место в управлении доменной плавкой. Нашими исследованиями [28] было показано, что для того чтобы решить вопрос о том, что надо контролировать и использовать для определения оптимального радиального газораспределения в доменной печи, необходимо для каждой печи и для её сырьевых и эксплуатационных условий плавки контролировать и форму радиального газораспределения на колошнике печи, и форму ЗП, а окончательный параметр контроля выбирать по результатам этого анализа. Для контроля радиального газораспределения на колошнике печи наиболее подходят разработанные ООО «АКОММ» неохлаждаемые РМТ [15]. Показания РМТ, кроме контроля радиального газораспределения на колошнике печи, используются для контроля формы ЗП с помощью двумерной математической модели (ДММ) [28].

Для количественной оценки РГ на колошнике печи по показаниям РМТ используются следующие два коэффициента:

$$КР = t_п / t_ц \text{ , дол. ед.,}$$

$$КРР = t_п / t_р \text{ , дол. ед.,}$$

где $t_п = 0{,}4\ t_1 + 0{,}4\ t_2 + 0{,}2\ t_3$ — температура газа в «периферийной» части колошника, °С;

$t_ц = 0{,}2\ t_3 + 0{,}4\ t_4 + 0{,}4\ t_5$ — температура газа в «центральной» части колошника, °С;

$t_р = 0{,}2\ t_1 + 0{,}2\ t_2 + 0{,}2\ t_3 + 0{,}2\ t_4 + 0{,}2\ t_5$ — температура по радиусу печи, °С;

t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 — показания термопар в пяти равновеликих по площади кольцах колошника (в центре печи-круга), считая от периферии к центру.

Дополнительно используется ещё один коэффициент:

$$КРС = t_{пс} / ткг \text{ , дол. ед.,}$$

где $t_{пс}$ — средняя температура периферийного газа, которую находят усреднением значений термопар ТПН, °С,

$t_{кг}$ — средняя температура колошникового газа, которую находят усреднением значений термопар ТГП, °С.

Сопоставлением коэффициентов радиальной неравномерности (КР, КРР и КРС) и параметров, характеризующих форму ЗП, с конечными показателями плавки (производительность печи и удельный расход кокса) показано для условий работы ДП-2 и ДП-10 ММК наибольшее влияние на них оказывают параметры ЗП [28].

6.3. Система оптимизации окружного газораспределения на колошнике

Для доменной печи, оборудованной БЗУ лоткового типа, вопрос контроля и регулирования окружного распределения шихты (ОРШ) принимает особенно важное значение. Предлагаемые способы регулирования окружного распределения газа (ОРГ) с помощью БЗУ лоткового типа недостаточны эффективны. Повышение равномерности ОРГ решается путем увеличения числа оборота лотка при выгрузке материалов в печь до 12–13 оборотов. Однако это увеличивает истирание шихты при загрузке её в печь: согласно исследований [29] содержание мелочи в железорудном материале и коксе при загрузке шихты с помощью БЗУ лоткового типа увеличивается в 2–3 раза по сравнению с загрузкой конусным загрузочным устройством (КЗУ). Увеличение содержания мелочи в шихте увеличивает общий перепад давления по высоте печи от фурменных очагов до уровня засыпи (ΔР). Факт увеличения ΔР на печах, загружаемых лотковыми БЗУ, по сравнению с печами, загружаемыми КЗУ, также отмечался в работе [29]. Увеличение ΔР вынуждает уменьшать расход дутья, что ведет к снижению производительности печи. Факт снижения производительности на печах, загружаемых лотковыми БЗУ, по сравнению с печами, загружаемыми КЗУ, отмечался в работе [30].

Проведённая работа показала, что наиболее подходят для контроля ОРШ и, возникающей при загрузке шихты в печь с помощью БЗУ лоткового типа, и её оптимизации периферийные термопары, установленные над уровнем засыпи (ПТН). Однако в настоящее время эти термопары практически не устанавливаются, хотя они могут быть использованы для контроля радиального и окружного распределения газового потока в доменной печи.

6.4. Система оптимизации окружного газораспределения в горне печи

Система предназначена для контроля и оптимизации окружной неравномерности температуры фурменных очагов (Тфо). Контроль осуществляется с помощью датчиков теплосъёма, устанавливаемых на всех воздушных фурмах ДП-2 (рис. 4), а оптимизация — за счет регулирования подачи добавок по фурмам (природного газа, ПУТ и др.), благодаря чему может достигнуто выравнивание Тфо (таблица 4).

Таблица 4

До перераспределения природного газа

	Распределение температур фурменных очагов для ДП 2 с 19.11.2011 12:45 по 19.11.2011 12:50																				
№ Фурмы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Средн.
Температура ФО, °С	2001	1762	1987	1929	1900	1970	1787	2166	2231	2060	2035	2204	2081	2022	2185	1946	1841	1876	2012	2069	**2003,2**
Задание на ПГ		↘					↘	↗	↗			↗			↗		↘	↘			

После перераспределения природного газа

	Распределение температур фурменных очагов для ДП 2 с 19.11.2011 12:55 по 19.11.2011 13:00																				
№ Фурмы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Средн.
Температура ФО, °С	2006	1950	1987	1935	1907	1980	1920	2030	2070	2021	1998	2090	2076	1960	2061	2009	1947	1973	2070	2072	**2003,1**
Задание на ПГ																					

6.5. Система оптимизации восстановительных процессов плавки

Система предназначена для определения такого соотношения косвенного (Ri) и прямого (Rd) восстановления железа в доменной печи, при котором достигается минимальный расход кокса. Такое соотношение принято считать оптимальным. Полученное в результате расчетов местоположение точки пересечения линий зависимостей от Rd расхода кокса как восстановителя и как теплоносителя определяет минимально возможный расход кокса (рис. 13).

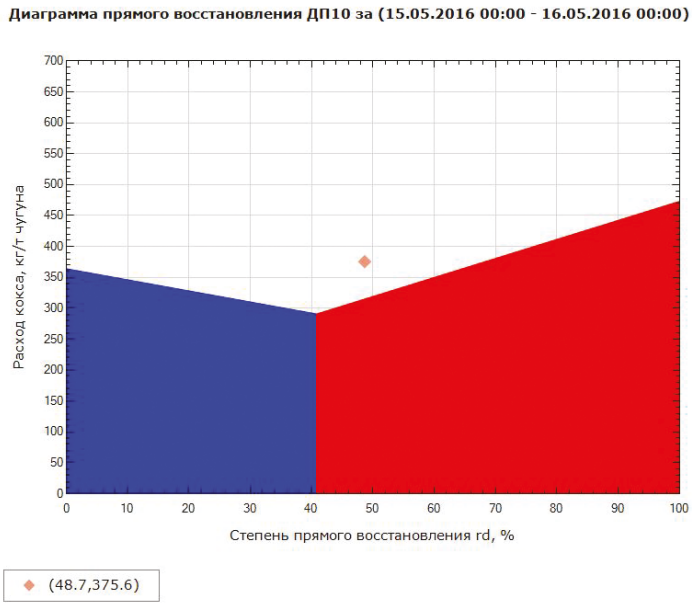


Рис. 13. Диаграмма прямого восстановления ДП10 за (15.05.2016 00:00 — 16.05.2016 00:00)

Целью создания системы является:

- использование величины невязок МТБ и некоторых параметров функционирования системы (рис. 14) для анализа протекания процессов доменной плавки и распознавания их отклонений от нормы на более ранних стадиях их развития;
- определение «динамических» невязок теплового баланса доменной плавки и их использование для контроля и прогноза теплового состояния шахты доменной печи;
- определение минимально возможного расхода кокса на производство чугуна при существующих условиях плавки и разработка мероприятий по его достижению;
- автоматическая диагностика достоверности основных информационных каналов АСУ ТП и своевременное обнаружение сбоев в их функционировании.

Определена последовательность действий при использовании системы для определения и достижения оптимизации следующих основных параметров плавки: газодинамического режима, радиального и окружного газораспределений, теплового состояния печи и восстановительных процессов. Последовательность действий зависит от местоположения на графике точки, свидетельствующей о текущем значении удельного расхода кокса при текущем значении степени прямого восстановления (рис. 13), и определяются следующими факторами:

- если текущие значения rd находятся в *установленных пределах* изменения rd («уставки»), то это свидетельствует о том, что соотношение косвенного и прямого восстановления находится в оптимальном диапазоне;
- в случае *выхода значений* rd *за пределы «уставки»* возможны следующие *два принципиально различных состояния* и соответствующие меры воздействия:
  — rd больше нормы,
  — rd меньше нормы.

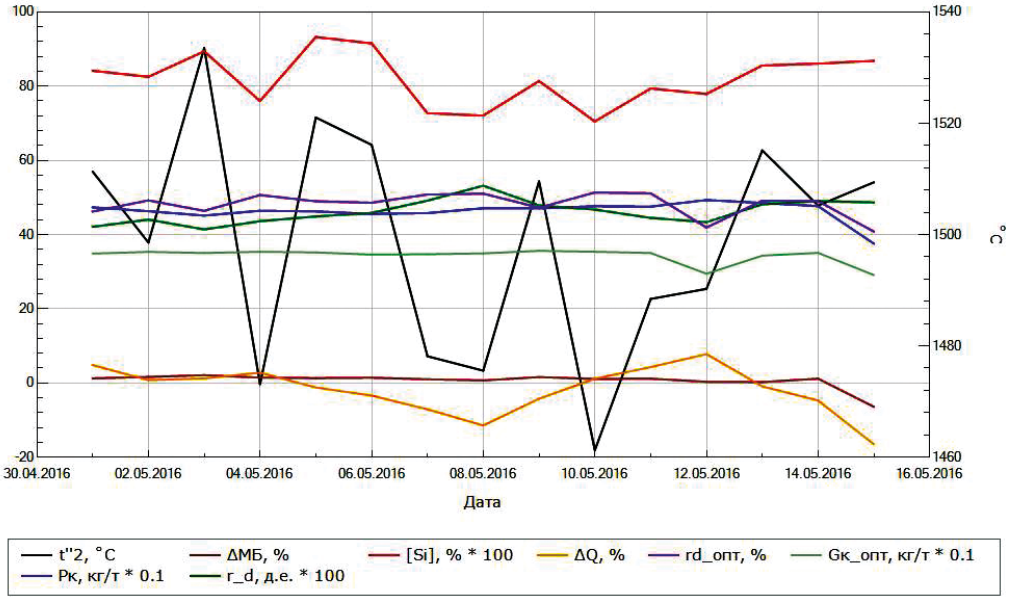


Рис. 14. Тренды параметров КМИН ДП10 (сутки) с 01.05.2016 по 16.05.2016

В ***первом случае*** (текущее значение rd больше оптимального) причинами превышения значения rd верхнего предела «уставки» может быть:

- недостаток восстановителя в печи. Необходимо или увеличить его расход (увеличив расход дутья), или его насыщенность, увеличив или расход природного газа, или кокса (в зависимости от нагрева «шахты» и «горна» печи);
- плохая работа газового потока. Необходимо принять меры для повышения эффективности работы газового потока изменением параметров загрузки для изменения или радиального, или окружного газораспределения.

Во ***втором случае*** (текущее значение rd меньше оптимального) это может происходит потому, что восстановителя в печи больше, чем нужно для данного состава и количества железорудных материалов. Мерами воздействия в зависимости от нагрева «шахты» и «горна» печи могут быть:

- уменьшение количества газа в печи
- снижение расхода кокса;
- снижение расхода природного газа.

6.6. Система оптимизации теплового состояния печи

Было установлено [1, 2], что критериями теплового состояния печи являются:

- температура материалов на выходе из «шахты» (шахта, распар и заплечики) печи (t''_2);
- температура продуктов плавки на выходе из «горна» печи (t''_4).

Нашими исследованиями показано, что важным фактором, оказывающим иногда решающее влияние на работу печи, является температура материалов на выходе из фурменных очагов (t''_3). Превышение некоторого её значения может привести к массовому горению воздушных фурм [31].

Для определения оптимального теплового состояния печи система осуществляет следующие операции: непрерывный контроль текущих значений t''_2 и t''_4; определение оптимальных значений t''_2 и t''_4; сравнение текущих и оптимальных значений t''_2 и t''_4; выбор по величине и знаку разницы между текущими и оптимальными значениями каждого критерия управляющих воздействий «сверху» (рудной нагрузкой) и «снизу» (параметрами дутья) для достижения оптимального теплового состояния печи. Оптимальные значения t''_2 определяются по результатам эксплуатации системы после определения экстремумов зависимостей расхода кокса и производительности печи от t''_2 (рис. 15). Порядок действий описан в докладе в настоящем сборнике [28].

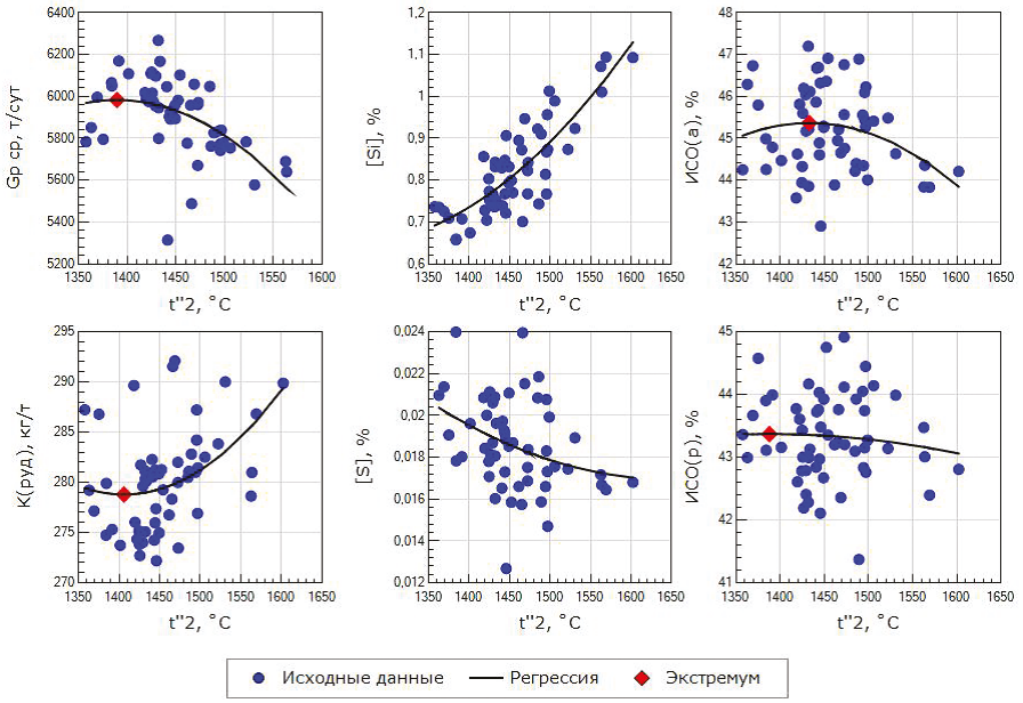


Рис. 15. Зависимость параметров работы ДП2 за сутки с 13.06.2015 по 12.08.2015

6.7. Система оптимизации параметров зоны плавления

Описание данной системы и результаты её функционирования даны в представленном в настоящем сборнике докладе [28].

7. ГРУППА СИСТЕМ «ПРОГНОЗ »

7.1. Система прогноза содержания кремния в чугуне

Система предназначена для прогнозирования содержания кремния в чугуне предстоящего выпуска с использованием самонастраивающейся (по результатам эксплуатации) статистической модели [18, 19] по данным о температуре всех фурменных очагов, средних за период от закрытия предыдущего до закрытия последнего выпуска, и о содержании кремния в чугуне ([Si]) двух последних выпусков. Результаты такого расчета представлены в виде кривой «Расчетное содержание Si в чугуне» на видеокадре «Изменение содержания Si в чугуне» (рис. 16).

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На доменных печах ОАО «ММК» проведена работа по технологическому насыщению созданных на них АСУ ТП за счет поэтапного внедрения локальных систем контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки.

2. Созданные в результате этой работы разной степени насыщенности на разных доменных печах цеха автоматизированные системы контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки (АСКОП ДП) позволяют проводить в режиме реального времени контроль и оптимизацию газодинамических, тепло- и массообменных процессов по высоте и сечению доменных печей. Решение этих вопросов позволило контролировать на ДП-1 и ДП-10 в реальном масштабе времени форму, местоположение и толщину зоны плавления и принимать меры к их оптимизации. Предложен и обоснован порядок проведения операций по достижению наилучших показателей плавки.

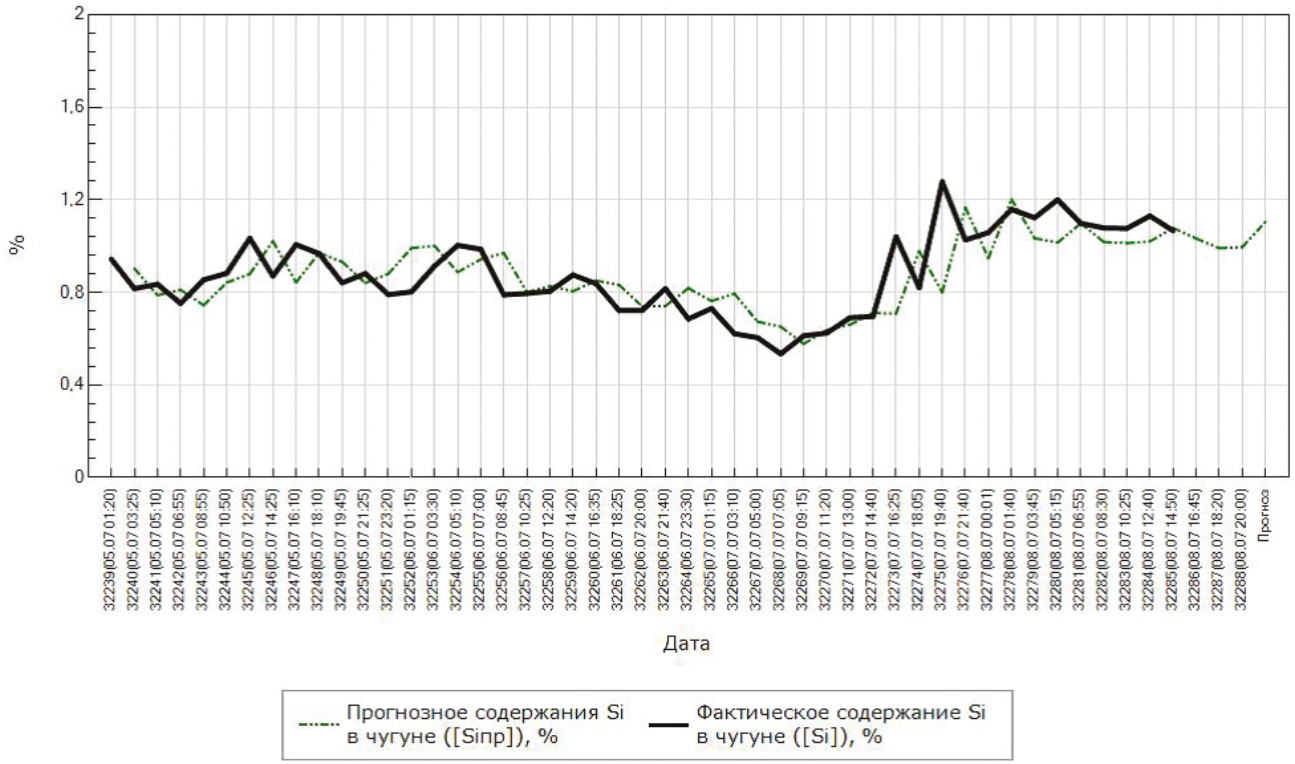


Рис. 16. Изменение содержания кремния в чугуне ДП2 с 05.07.2016 по 08.07.2016

3. Проведённая работа показала, что используемые в системе математические модели и современные технические средства позволяют технологически насыщать создаваемые и уже созданные АСУ ТП доменных печей. Это помогает технологическому персоналу доменных печей эффективно управлять плавкой для достижения максимальной производительности и минимального расхода кокса при данных сырьевых и эксплуатационных условиях плавки.

4. Опыт проведения работы по технологическому насыщению существующих или создаваемых АСУ ТП доменной печи показал, что в современных условиях (при практическом отсутствии в СНГ специализированных организаций и значительном сокращении технологических и IT-служб металлургических предприятий) наиболее целесообразно проводить подобную работу по этапам, последовательно внедряя близкие по технологическому назначению системы. Это позволит накопить опыт работы по внедрению локальных систем и взаимодействию различных служб предприятий, эффективно контролировать достоверность поступающей информации и выдаваемых рекомендаций и т.д.

5. ООО «АКОММ» готов оказывать методическую и организационную помощь в постановке и проведении работы, поставлять программные продукты, осуществлять их наладку и адаптацию к конкретным условиям плавки, а также проводить технологическое сопровождение и техническую поддержку программного обеспечения внедряемых систем.

Список литературы

1. В.М. Паршаков, Ю.В. Яковлев, Г.П. Лежнев и др. Результаты исследований процессов в печах и воздухонагревателях доменного цеха ММК. «Сталь», 2007, № 2. С. 31–37.
2. В.М. Паршаков. Автоматизированная система оптимизации доменной плавки. «Сталь», 2004, № 3, с. 7–13.

3. В.М. Паршаков. Повышение эффективности использования пылеугольного топлива в доменной печи. «Сталь», 2005, № 8. С. 32–37.
4. В.М. Паршаков, А.А. Третяк, А.П. Уланов. АСУ ТП доменной плавки и её технологическое насыщение. Доменное производство — XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков. — М.: Издательский дом «Кодекс», 2010. — С. 391–413.
5. В.М. Паршаков, Р.С. Тахаутдинов, Ю.А. Бодяев и др. Контроль радиального газораспределения в оборудованных БЗУ доменных печах ММК с помощью многоточечных термозондов. «Сталь», 2009, № 10, с. 16–19.
6. В.М. Паршаков, А.В. Чевычелов, А.А. Полинов и др. Внедрение непрерывного автоматического контроля радиального газораспределения в доменных печах. Труды Международного конгресса доменщиков. Ялта, 2013, с. 358–375.
7. В.М. Паршаков, А.В. Чевычелов, А.А. Полинов и др. Использование БЗУ лоткового типа для управления радиальным и окружным распределением шихты в доменных печах. Труды Международного конгресса доменщиков. Ялта, 2013, с. 376–385.
8. В.М. Паршаков, А.В. Чевычелов, А.А. Полинов и др. Внедрение системы оптимизации параметров дутья на доменных печах ОАО «ММК». Доменное производство — XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков. — М.: Издательский дом «Кодекс», 2010. — С. 426–441.
9. В.М. Паршаков, А.В. Чевычелов, А.А. Полинов и др. Внедрение на доменных печах ОАО «ММК» автоматизированной системы контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки. Труды Международного конгресса доменщиков. Ялта, 2012, с. 274–307.
10. В.М. Паршаков, А.В. Чевычелов, А.А. Полинов и др. Повышение эффективности доменной плавки за счет технологического насыщения АСУ ТП, созданных на доменных печах ОАО «ММК». «Инженерные решения. Черная металлургия», 2012, № 2, с. 2–6.
11. П.Ю. Довженко, А.В. Краснобаев, В.М. Паршаков и др. Разработка подсистемы информационного обеспечения системы контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки. «Инженерные решения. Черная металлургия», 2013, № 1, с. 14–15.
12. В.М. Паршаков, Бабушкин, В.Н. Тимофеев. Разработка метода контроля распределения газового потока по радиусу печи. «Теплотехника доменного и агломерационного процессов». «Металлургия». М., 1966, с. 292–305.
13. В.М. Паршаков, Н.М. Бабушкин, Б.А. Боковиков и др. Количество и распределение газового потока в доменной печи и его влияние на показатели плавки. «Сталь», 1971, № 12, с. 1069–1074.
14. В.М. Паршаков и др. Устройство для контроля распределения температуры газа по радиусу колошника доменной печи. Авторское свидетельство СССР №1016363 . «Открытия. Изобретения», 1983, № 17, с. 12.
15. А.А. Третяк, В.М. Паршаков, М.В. Чемикосов и др. Достоверность информации о распределении газового потока по радиусу колошника доменной печи, получаемой разными способами измерений. Доклад в настоящем сборнике.
16. Большаков В.И. Теория и практика загрузки доменных печей. — М.: Металлургия, 1990. — 255 с.
17. С.А. Загайнов, С.В. Филатов, В.В. Филиппов и др. Оптимизация загрузки многокомпонетной шихты с использованием БЗУ. Доменное производство — XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков. — М.: Издательский дом «Кодекс», 2010. — С. 103–105.
18. В.А. Заболотских, В.М. Паршаков, Г.К. Кабаков, Ю.В. Федулов. Использование информации о теплосъёме с охлаждающей фурмы водой для контроля теплового состояния нижней части доменной печи. «Совершенствование тепловой работы и конструкций металлургических агрегатов». Сборник трудов. «Металлургия», М., 1982, с. 22–26.
19. В.А. Заболотских, В.М. Паршаков, Ф.Р. Шкляр. Расчет температур в фурменных очагах доменной печи на основе информации датчиков теплосъёма. «Теплотехника основных металлургических переделов». Сборник трудов. «Металлургия», М., 1984, с. 33–36.
20. V.M. Parchakov, B.A. Bokovikov, F.P. Shklar et al. Mathematical model for the gas flow dynamics and heat and mass transfer processes in the hearth of a blast furnace and its use in the analysis of smelting. «International blast furnace hearth and raceway symposium». Australia, Newcastle, 1981, p.15–1 — 15–6.

21. В.М. Паршаков, П.Б. Федотов, Б.А. Боковиков, Ф.Р. Шкляр. Модель процессов в фурменных очагах доменной печи. «Производство чугуна». Межвузовский сборник. Издание УПИ. Свердловск, 1981, с. 42–47.
22. V.M.Parchakov, P.B.Fedotov, F.P.Shklar et al. The extent of raceways in a blast furnace and its dependence on combined blast parameterws. «International blast furnace hearth and raceway symposium». Australia, Newcastle, 1981, p. 5–1 — 5–4.
23. П.Б. Федотов, В. Паршаков, Г.П. Лежнев и др. Экспериментальная проверка зависимости для определения протяженности фурменного очага. «Совершенствование тепловой работы и конструкций металлургических агрегатов». Сборник трудов. «Металлургия», М., 1982, с. 26–29.
24. В.М. Паршаков, Ф.Р. Шкляр, О. Л. Голубков. Исследование распределения тепла от окисления металла в фурменных очагах доменной печи между проходящими через них продуктами плавки и газами. «Металлургическая теплотехника». Сборник трудов № 6. М., «Металлургия», 1978, с. 6–9.
25. V.M.Parchakov, B.A.Bokovikov, F.P.Shklar. Determination of optimum conditions for favourable level of application of combined hot blast. «Reports of the 6 international conference on ironmaring «VITKOVICE 1979». 1979, CZECHOSLOVAKIA, OSTRAVA 6, p. 364–374.
26. Доброскок В.А. Специальные системы загрузки доменных печей. «Черные металлы», сентябрь, 2007. С.13–21.
27. В.М. Паршаков. Теплообмен в шахте доменной печи и его влияние на расход кокса. «Повышение производительности и экономичности работы тепловых металлургических агрегатов». Сборник трудов. «Металлургия». М., 1982, с. 49–53.
28. В.М. Паршаков, А.А. Полинов, А.В. Павлов и др. Непрерывный автоматический контроль, количественная оценка и оптимизация параметров зоны плавления с помощью двумерной математической модели, учитывающей процессы по высоте и сечению домной печи от уровня засыпи до чугунной лётки. Статья в настоящем сборнике.
29. Покрышкин В.Л., Большаков В.И., Хомич И.Т. и др. Особенности распределения материалов в доменной печи объёмом 5000 м^3 с бесконусным загрузочным устройством. Сталь. 1982, № 11, с. 13–16.
30. Тарасов В.П., Тарасов П.В., Быков Л.В. Газодинамические параметры и показатели работы печей при загрузке шихты типовым конусным и безконусным загрузочными устройствами. Сталь. 2005, № 1, с. 6–10.
31. В.М. Паршаков, Н.М. Бабушкин и П.Б. Федотов. Метод оценки теплового состояния горна доменной печи и его приложение к анализу причин горения фурм. «Сталь», 1980, № 3, с. 174–177.

В.М. Паршаков, ООО «АКОММ»,
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
А.А. Полинов, А.В. Павлов, И.Е. Прохоров,
А.В. Колосов, П.Ю. Довженко, ОАО «ММК»

НЕПРЕРЫВНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ, КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДВУМЕРНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ПРОЦЕССЫ ПО ВЫСОТЕ И СЕЧЕНИЮ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ОТ УРОВНЯ ЗАСЫПИ ДО ЧУГУННОЙ ЛЁТКИ

1. ВВЕДЕНИЕ

Аналитический анализ работ, направленных на контроль и управление зоной плавления (ЗП) железорудных материалов (ЖРМ) в доменной печи, показал их исключительную важность для повышения эффективности работы и срока службы доменных печей. Установлено, что из всех возможных методов постоянного автоматического контроля ЗП реальным является расчетный метод с использованием двумерной математической модели (ДММ), описывающей процессы, протекающие по высоте и сечению печи от уровня засыпи до чугунной летки. Разработанная нами ДММ [1–8] отвечает поставленным требованиям и является основным инструментом системы для

контроля и оптимизации параметров ЗП в реальном масштабе времени, реализованной в составе АСУ ТП доменных печей № 2 и № 10 ОАО «ММК» (система «Когезия»). Система использует уже установленные на печах средства автоматизации, микропроцессорной и вычислительной техники.

2. ДВУМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ИСПОЛЬЗУЕМАЯ В СИСТЕМЕ

Двумерная математическая модель (ДММ) включает следующие математические модели (ММ):
• тепло- и массообмена в двух верхних (по Б.И. Китаеву) зонах доменной печи от уровня засыпи до фурменной зоны (модуль «шахта») [1];

- газодинамических, тепло- и массобменых процессов в двух нижних зонах печи: фурменных очагов и окончательного формирования состава и нагрева продуктов плавки (модуль «горн») [2–5]. С помощью этого модуля рассчитывают температуру материалов на входе в фурменные очаги (на выходе из «шахты» печи, т.к. численно они равны) (t''_2) и балансовую температуру газов на выходе из них (T''_3). Полученные значения температур являются граничными условиями для расчета теплообмена в шахте печи;
- одномерная модель, описывающая газодинамические, тепло- массообменные процессы по всей высоте печи от уровня засыпи до чугунной летки, включающая модули «шахта» и «горн» (модуль «домна») [6];
- радиально неравномерного двухступенчатого теплообмена в пяти равновеликих по объему осесимметричных частях «шахты» печи в противотоке с постоянными теплоемкостями потоков шихты и газов на каждой из двух ступеней. Количество газа и шихтовых материалов в кольцевых частях находят решение в представленной в работе [7] системы уравнений потери напора, теплового и материального балансов для первой зоны теплообмена — от уровня засыпи до положения изотермы температуры начала реакций прямого восстановления. Из уравнений теплового баланса для второй зоны, аналогичных для первой и отличающихся тем, что, кроме потерь тепла, учитываются тепловые эффекты плавления и реакций восстановления, определяют температуру материалов на выходе из каждой кольцевой части с соблюдением условия, что найденная по этим значениям средневзвешенная температура материалов на входе в фурменную зону равна t''_2;
- полная ДММ доменной печи, созданная с использованием модулей «шахта», «горн», «домна» и «радиус» [8]. В итоге ДММ находит распределение температур материалов и газов по высоте каждого кольца и положение ЗП как пространство между двумя изотермами — начала и конца плавления ЖРМ [8–10].

Для проверки адекватности впервые разработанного модуля «Горн» и разработки приёмов его адаптации к реальным условиям плавки были проведены исследования по зондированию фурменных очагов доменных печей ММК [11–13]. В результате исследований было получены выражение для определения протяженности фурменных очагов [11] и данные о действительной температуре газа в фурменных очагах [12], которые использовались для адаптации модуля «Горн» к реальным условиям плавки.

Необходимым условием функционирования модуля «Радиус» и всей ДММ является наличие данных о температуре газа, выходящего из кольцевых частей «шахты» печи. Экспериментальными исследованиями на доменной печи [14] показано, что температуру газа по радиусу печи можно измерять с помощью неохлаждаемых радиальных многоточечных термопар (РМТ), устанавливаемых стационарно над уровнем засыпи [14–16].

3. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ СИСТЕМЫ «КОГЕЗИЯ»

Система «Когезия» позволяет решать следующие технологические задачи: непрерывный автоматический контроль параметров ЗП и их количественная оценка; выявление влияния параметров ЗП на показатели плавки и их количественная оценка; установление входных и выходных параметров плавки, влияющих на параметры ЗП, и их количественная оценка; определение оптимальных

значений параметров ЗП, обеспечивающих наилучшие показатели плавки; выбор параметров плавки, направления, величины и порядка их изменения для достижения оптимальных значений параметров ЗП.

4. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ И ИХ КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА

Анализ экспериментов, проведенных в мире на работающих и замороженных доменных печах и на их физических и математических моделях, показал, что работа доменных печей зависит от следующих параметров ЗП: форма, местоположение (относительно фурменных очагов или уровня засыпи) и толщина. К сожалению, в технической литературе нет данных о количественной оценке параметров ЗП, их связи с показателями плавки и их влиянии на показатели плавки. Важным преимуществом предлагаемой системы является то, что с её использованием возможно количественно оценивать параметры ЗП, их влияние на показатели плавки и решать обратную задачу — определение параметров плавки, с помощью изменения которых возможно добиться оптимальных значений параметров ЗП.

В качестве примера на рис. 1 представлены форма, местоположение и толщина ЗП, определенные по усреднённым за сутки данным о работе печей № 2 «ММК». На этих рисунках представлены также расстояния от «корня» (нижней границы ЗП) до верхней границы фурменных очагов, температура материалов и продуктов плавки на входе (t''_2) и на выходе (t''_3) из них.

Для оценки формы использовали следующие параметры:

α — угол наклона ЗП (по линии конца плавления) от корня к периферии печи, град.;

β — угол наклона ЗП от корня к оси печи, град.;

Для оценки местоположения ЗП использовали следующие параметры:

L (ФО — к) — расстояние от линии верха фурменных очагов (ФО) до корня ЗП, м;

$L_{ср2}$ — расстояние от линии верха ФО до линии плавления как среднеарифметическое трёх измерений: на периферии, в корне и на оси печи, м;

$\Delta(t''_2 - t_{пл})$ — разность температуры материалов на входе в фурменные очаги (t''_2) и температуры плавления ЖРМ ($t_{пл}$ = 1300), °С.

Для оценки толщины ЗП использовали следующий параметр:

$H_{ср}$ — толщина ЗП как среднеарифметическое трех измерений: расстояния от линии начала до линии конца плавления на периферии, в корне и на оси печи, м.

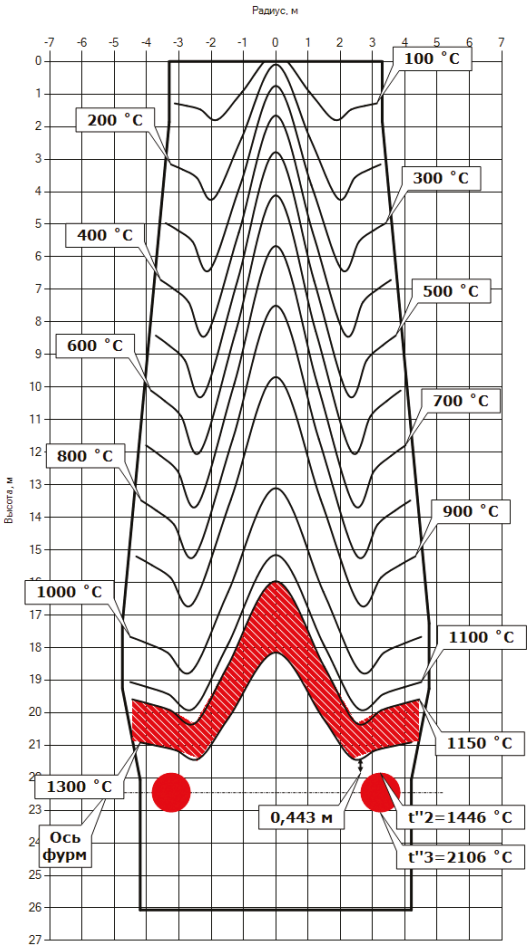


Рис. 1. Поля изотерм материалов ДП2 за сутки (15.04.2015 00:00 — 16.04.2015 00:00)

5. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАВКИ

Количественная оценка параметров ЗП позволяет проводить оценку их влияния на конечные показатели плавки. Это позволяет выбрать оптимальные значения параметров ЗП, обеспечивающих наилучшие показатели плавки.

5.1. Влияние формы зоны плавления

Вопросы контроля радиальной неравномерности занимают важное место в управлении доменной плавкой. В практической деятельности при контроле радиального распределения важное место занимают факторы «раскрытия» периферии и центра печи.

Из рис. 2 видно, что «раскрытие» периферии в распаре и заплечиках (рост угла α от 0 до 40) ведет к значительному снижению производительности печи (снижение «проплава» шихты Gp от 6400 до 5850 т ЖРМ /сутки) и повышению [Si] от 0,7 до 1,1% во всем диапазоне изменения угла α. Было показано, что не целесообразно открывать периферию печи. Это соответствует общепринятым представлениям.

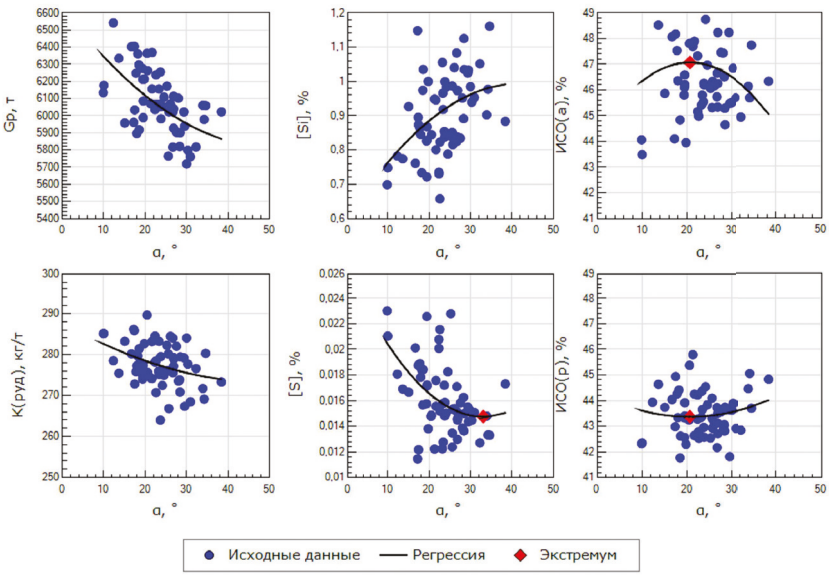


Рис. 2. Зависимость параметров работы ДП2 за сутки с 20.03.2015 по 20.05.2015

Из рис. 3 видно, что увеличение угла наклона ЗП от корня к оси печи (β), свидетельствующее о «раскрытии» центра печи в районе распара-заплечиков, ведёт к существенному снижению производительности печи (снижение Gp от 6400 до 5850 т ЖРМ/сутки), значительному росту содержания кремния в чугуне (от 0,7 до 1,1) и снижению степени использования СО (ИСО). Эти данные, расходятся с общепринятыми представлениями, в которых утверждается, что для повышения эффективности работы печи целесообразно большое раскрытие её центра для образования большого количества «коксовых окошек». Нашими исследованиями показано, что изменение формы ЗП за счет подъёма её вершины на оси печи приводит к снижению производительности печи.

Распространённое среди доменщиков мнение о необходимости открытия центра печи (изменять форму ЗП за счет подъёма её вершины на оси печи), наверное, было справедливо для доменных печей с конусными засыпными аппаратами и для шихты с крупными кусками, когда большие количества кокса и агломерата одновременно загружались в печь, образуя слои кокса и агломерата, которые, возможно, сохранялись до ЗП. При использовании БЗУ и более мелкой шихты (особенно мелкой для доменных печей ММК при использовании, так называемого, классифицированного агломерата), когда кокс и агломерат (окатыши), имеющие в три раза отличающиеся насыпные плотности, загружают раздельно, то, по-видимому, имеет место выклинивание агломерата (окатышей) при попадании их на загруженный слой кокса. На работающей печи это усугубляется тем, что столб шихты уравновешивается подъёмными силами газового потока на 50–60% (критерий газодинамической устойчивости слоя Ny = 0,5–0,6 [16]). В этом случае ЖРМ высыпается на практически взвешенный слой кокса, т.к. при Ny = 0,5–0,6 начинается дополнительное разрыхление шихты, и особенно, коксового слоя. Поэтому выклинивание агломерата и, особенно, окатышей неизбежно.

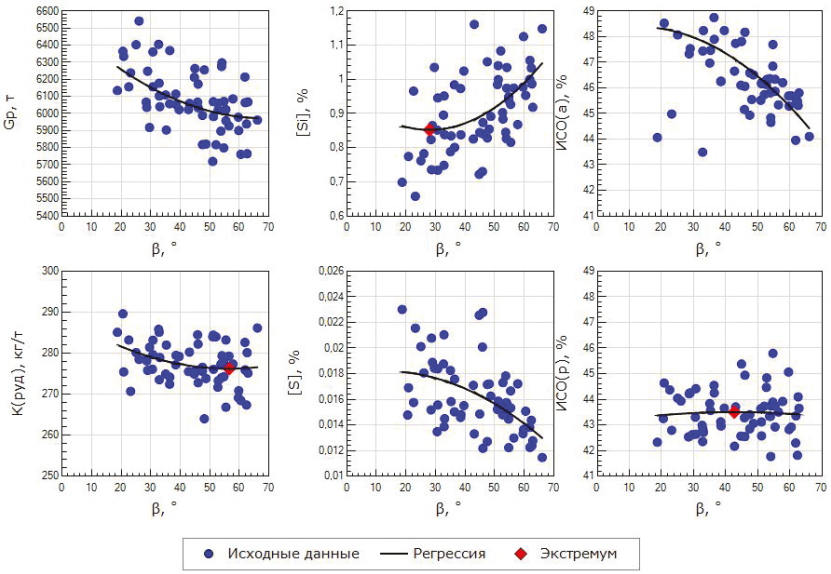


Рис. 3. Зависимость параметров работы ДП2 за сутки с 20.03.2015 по 20.05.2015

Однако это не даёт ответа на следующий вопрос: «Почему чем меньше углы α и β, т.е. чем ближе ЗП к горизонтальному расположению, тем больше производительность печи доменных печей № 2 и № 10 ММК»?

Проведенными нами ранее исследованиями [16–19] и исследованиями, выполненными В.К. Дурновым [20], было установлено:

- полидисперсная доменная шихта (в отличие от монодисперсной, которая закипает сразу при достижении уравновешивания её на 90–100%) при уравновешивании её подъёмными силами газового на 50–60% (критерий газодинамической устойчивости слоя Ny = 0,5–0,6) начинает дополнительно разрыхляться, увеличивая порозность слоя шихты [16], и тем больше, чем больше подпирающее воздействие газового потока. Важен также и тот факт, что за счет движения порозность слоя увеличивается ещё на 10 % [21, 22];
- разрыхление шихты начинается снизу, при исчезновении «нижнего» слоя и так далее, «перебирая слой за слоем» до самого верха. При сохранении подпирающего воздействия (при сохранении газового потока) структура слоя сохраняется. В каждом слое материалов куски его (при подпирающем воздействии газового потока) перестраиваются для уменьшения их «парусности». В образовавшихся пустотах между крупными кусками закипают, способные к этому, мелкие куски. Это также ведёт к увеличению порозности шихты [17], т.е. к уменьшению количества шихты в объёме печи и к снижению, в следствие этого, выплавки чугуна [18]. Отсюда нами был сделан вывод о том, что доменную плавку надо вести на границе дополнительного разрыхления шихты [16]. Этим было объяснено оптимальное количество дутья с точки зрения газодинамики слоя;
- расчетами [19] было показано, что на границе дополнительного разрыхления шихты (т.е. при достижении оптимального расхода дутья) на колошнике и в середине шахты печи способны к закипанию куски агломерата, соответственно, 10 и 8 мм и кокса, соответственно, 27 и 18 мм.

Учитывая изложенное, можно предположить, что при движении слоев кокса и агломерата (окатышей) от верха к низу печи, учитывая неизбежную вибрацию, трение шихты о стенки печи, возрастающую температуру газового потока и усиливающееся подпирающее воздействие газового потока, происходит просыпание кусков агломерата (особенно мелких, как на ММК) и окатышей (как боле тяжелых по сравнению с коксом) через взвешенные куски кокса. Поэтому можно предположить, что к моменту плавления ЖРМ слои агломерата (окатышей) и кокса окончательно перемешиваются и форма ЗП уже не оказывает влияния на сопротивление проходу газов через неё. В то же время, заполнение тех «пустот» (ранее в них отсутствовали ЖРМ), которые образовывались под ЗП на периферии и в центре

печи, железорудными материалами, приводит к увеличению выплавки чугуна. Поэтому во всех рассмотренных случаях на обоих доменных печах (№ 2 и № 10) при увеличении углов наклона ЗП от корня к периферии (α) и к оси (β) печи производительность снижалась.

5.2. Влияние положения зоны плавления по высоте доменной печи

Подъём ЗП вверх по высоте печи, увеличивая расстояние от фурменных очагов (ФО) до корня ЗП (рис. 4) и до линии плавления (рис. 5), уменьшает количество ЖРМ в доменной печи. Это ведет к снижению производительности печи. Снижение ЖРМ, при сохранении количества и нагрева газов в печи, ведет к увеличению её нагрева, выражающееся в увеличении содержания кремния и снижении серы в чугуне. Такое же изменение показателей плавки происходит при увеличении разности температуры материалов на входе в фурменные очаги (t''_2) и температуры плавления ЖРМ ($t_{пл}$), принятой нами 1300 °С (рис. 6), также свидетельствующем о подъёме ЗП вверх по высоте печи.

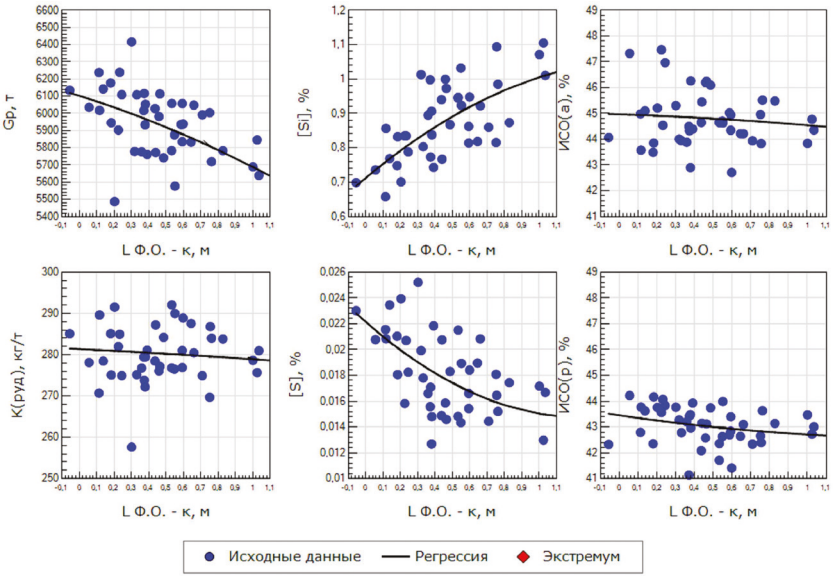


Рис. 4. Зависимость параметров работы ДП2 за сутки с 10.05.2015 по 09.07.2015

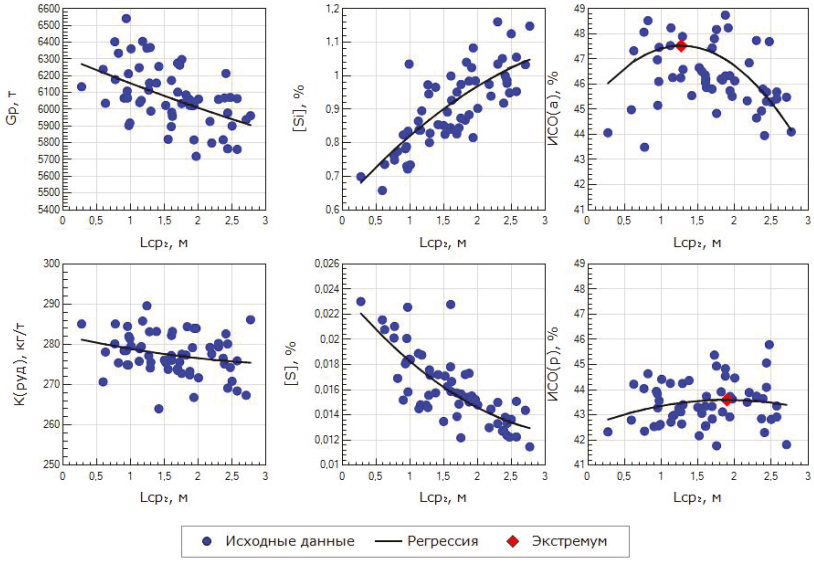


Рис. 5. Зависимость параметров работы ДП2 за сутки с 20.03.2015 по 20.05.2015

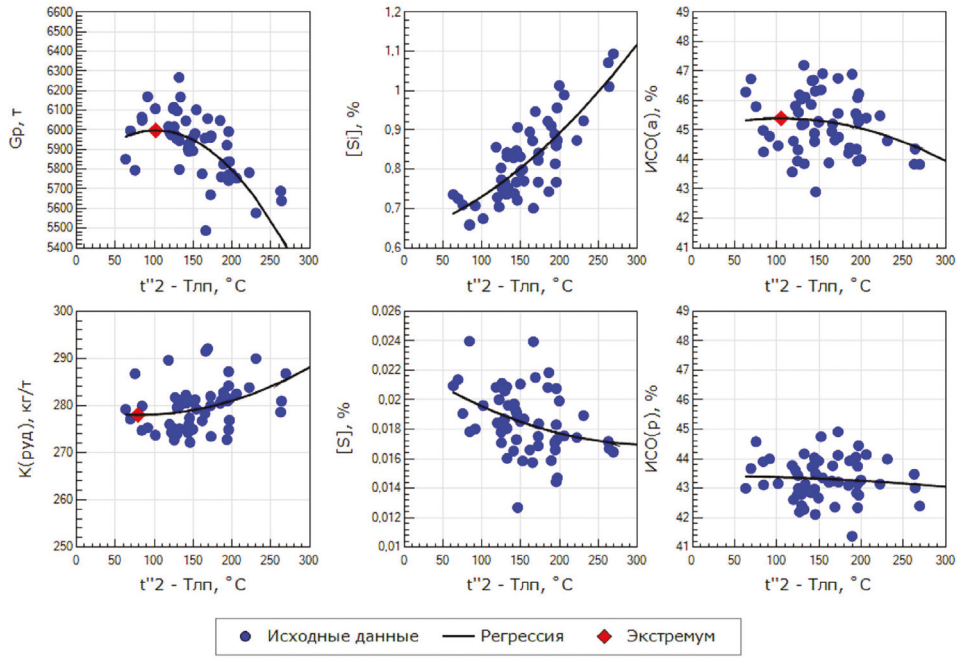


Рис. 6. Зависимость параметров работы ДП2 за сутки с 13.06.2015 по 12.08.2015

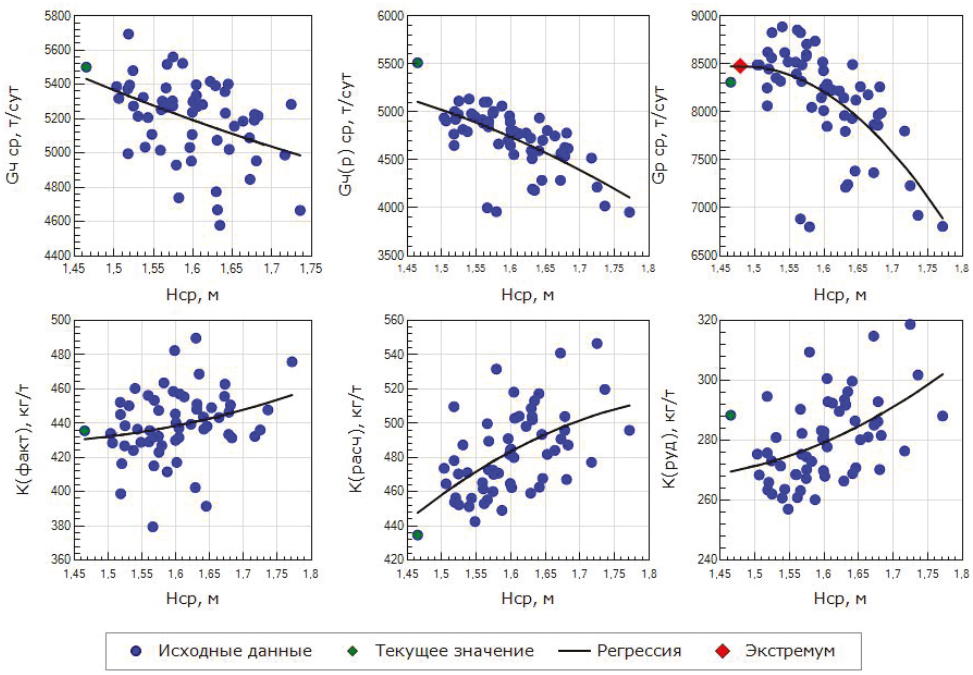


Рис. 7. Зависимость параметров работы ДП10 за сутки с 21.01.2016 по 21.03.2016

5.3. Влияние толщины зоны плавления

На рис. 8 представлено влияние толщины зоны плавления на показатели работы печи. Из этого рисунка видно, что увеличение толщины ЗП ведет к снижению производительности печи и увеличению расхода кокса. Из представленных данных видно, что увеличение толщины ЗП, как и следовало ожидать, оказывает отрицательное влияние на работу доменной печи.

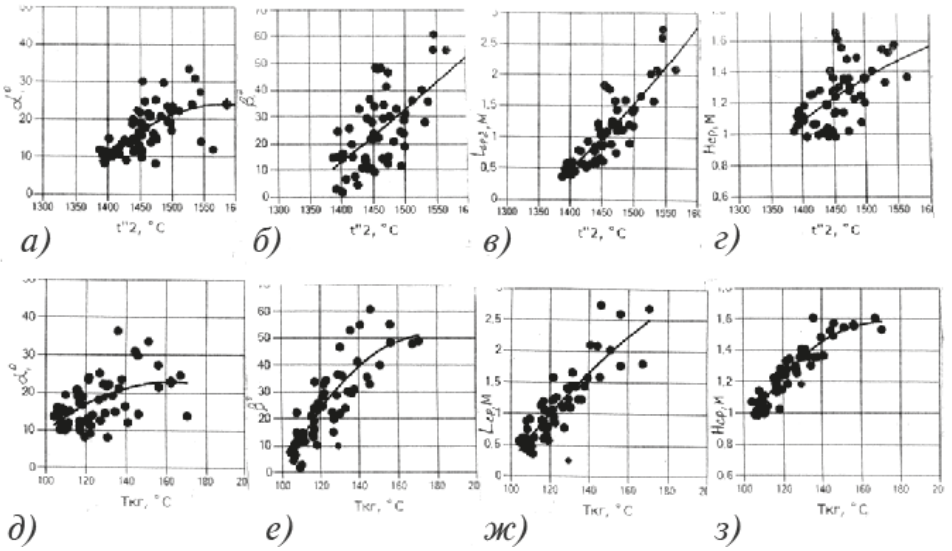


Рис. 8. Влияние нагрева «шахты» печи на параметры зоны плавления

6. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ НА ПАРАМЕТРЫ ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ

Система позволяет решать обратную задачу — количественно оценить влияние параметров доменной плавки на параметры ЗП. Это позволяет выбрать те параметры работы печи, изменяя которые можно достигнуть оптимальных параметров ЗП.

Наибольшее влияние на форму, местоположение и толщину ЗП оказывает нагрев печи: и «шахты» печи, и «горна» печи.

6.1. Как видно из рис. 8а и рис. 8б, рост нагрева «шахты» печи (о чем свидетельствует рост t''_2) увеличивает «раскрытие» и периферии, и, особенно, центра печи (рис. 8б). Рост t''_2 ведёт также, как видно из рис. 8в и рис. 8г, к подъёму ЗП верх по высоте печи и к увеличению её толщины. О подобном воздействии роста нагрева «шахты» печи можно судить по влиянию температуры колошникового газа (Ткг). Как видно из рис. 8д — рис. 8з, при увеличении Ткг увеличивается раскрытие периферии и центра печи, ЗП поднимается вверх по высоте печи и увеличивается её толщина.

6.2. Такое же действие оказывает рост нагрева «горна» печи (параметры t''_4 и [Si]): увеличивает раскрытие периферии (рис. 9а и рис. 9д) и центра (рис. 9б и рис. 9е), поднимает ЗП вверх по высоте печи (рис. 9в и рис. 9ж) и увеличивает её толщину (рис. 9г и рис. 9з).

Таким образом, представленные данные показали решающее влияние нагрева печи на форму, местоположение и толщину ЗП: повышение нагрева печи увеличивает неравномерность распределения ЗП по вертикальному сечению печи (углы α и β увеличиваются), поднимает ЗП вверх по высоте печи (расстояние ЗП от линии фурменных очагов увеличивается) и увеличивает толщину ЗП ($H_{ср}$ увеличивается). Всё это, как было показано ранее, снижает производительность печи.

7. ПРИЁМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКОЙ И ОЧЕРЁДНОСТЬ ИХ ПРОВЕДЕНИЯ

Важное место в ведении доменной плавки занимает очередность операций для достижения наилучших показателей. Она обоснована по степени влияния мер воздействия на конечные показатели плавки.

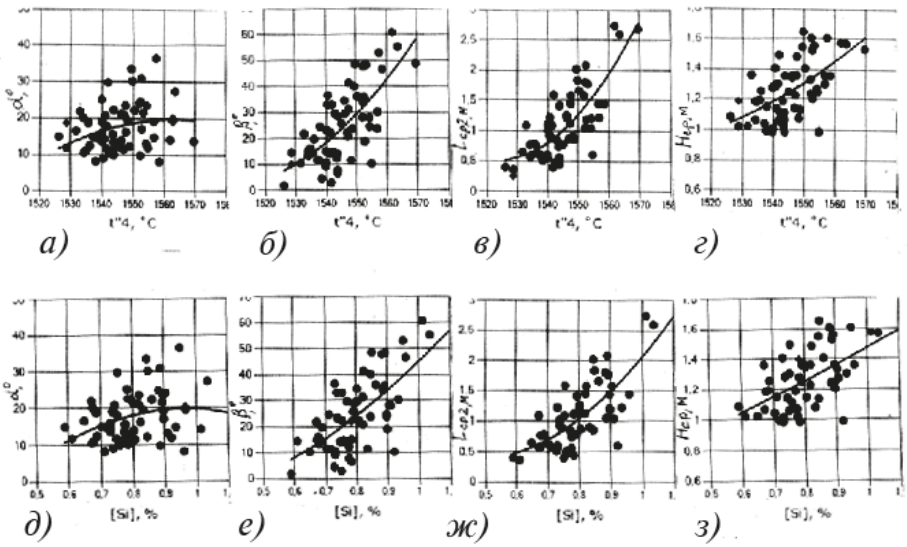


Рис. 9. Влияние нагрева «горна» печи на параметры зоны плавления

7.1. Оптимизация газодинамического режима плавки

Поскольку расход дутья оказывает решающее влияние на конечные показатели плавки и обуславливает распределение газового потока по сечению печи, то, в первую очередь, надо найти и поддерживать оптимальное для данных сырьевых и эксплуатационных условий плавки количество подаваемого в доменную печь дутья (рис. 10), определяемое газодинамической устойчивостью столба шихтовых материалов [16].

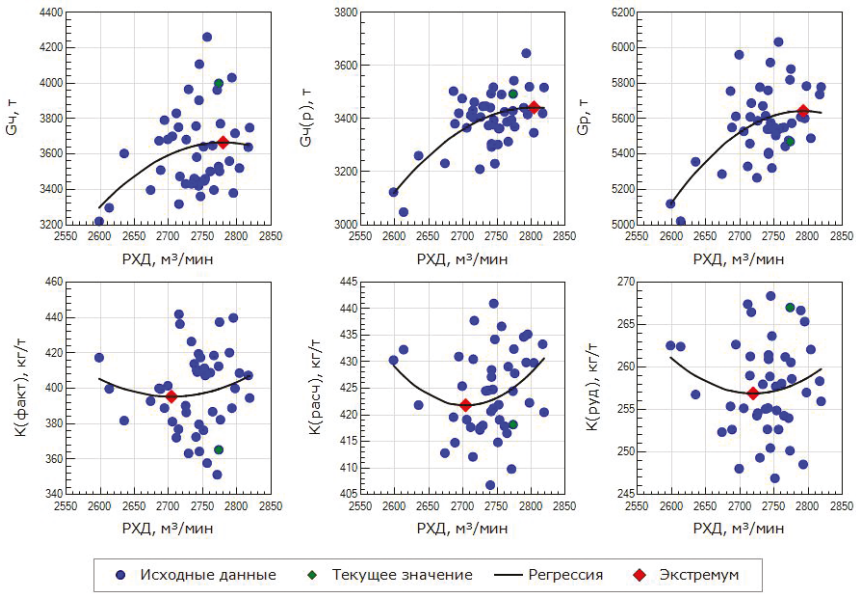


Рис. 10. Зависимость параметров работы ДП1 за сутки с 26.01.2016 по 13.03.2016

7.2. Оптимизация радиальной неравномерности

Следующим по важности фактором для достижения наилучших технико-экономических показателей плавки (ТЭПП) является оптимизация распределения по вертикальному сечению печи. Вопросы контроля радиального газораспределения занимают важное место в управлении доменной плавкой. Как показывает зарубежный опыт [23–25], только за счет оптимизации радиального газорас-

пределения расход кокса можно снизить на 10–30 кг/т чугуна. Однако не решен окончательно вопрос о том, что нужно оптимизировать: или форму температурной кривой на колошнике печи, или форму зоны плавления (ЗП): имеются данные о преобладающем влиянии ЗП на распределение газового потока [23]. В некоторых работах (например, в [26]) ЗП рассматривается как распределитель газового потока в печи. Поэтому появился целый ряд работ, в которых полученные результаты плавки связывают не столько с распределением параметров газа на колошнике доменной печи, сколько с формой ЗП.

В настоящем докладе показано, что для каждой доменной печи необходимо находить то, что оказывает решающее влияние на конечные показатели плавки: или радиальное газораспределение на колошнике печи, или форма ЗП в распаре — заплечиках печи. Количественная оценка РГ на колошнике и параметров, характеризующих форму ЗП в заплечиках печи, позволяет одновременно сравнить влияние этих факторов на конечные показатели плавки и выбирать параметр и место для дальнейшего контроля. В качестве параметра количественной оценки РГ на колошнике печи принят коэффициент радиальной неравномерности КР [27]. Сравнение влияния показателя КР на конечные показатели плавки показало слабое влияние изменения распределения газового потока на колошнике печи на производительность и нагрев печи.

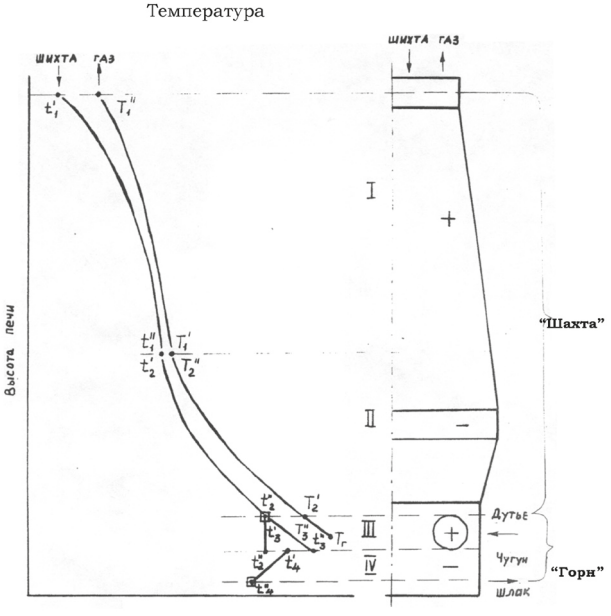
В качестве параметров количественной оценки формы ЗП приняты углы наклона линии плавления ЖРМ от «корня» к стенке (α) и к оси (β) печи (рис. 2 и рис. 3). Из этих рисунков видно, что рост углов α и β, свидетельствующий об изменение формы ЗП в сторону подъёма её на периферии и на оси печи, уменьшает количество ЖРМ (от 6400 до 5800т ЖРМ/сутки) в обоих случаях. Уменьшение ЖРМ в печи (при сохранении количества и нагрева газов в печи) ведет к увеличению её нагрева — к увеличению содержания кремния в чугуне от 0,7 до 1,1 в обоих случаях. Вызвано это тем, что мастер печи параметры ЗП, естественно, не контролирует и поэтому не знает об уменьшении ЖРМ в печи, поэтому мер по изменению количества и нагрева газов в печи не принимает. Это позволило сделать вывод о большем влиянии на показатели плавки для печей ММК радиального распределения в заплечиках печи, чем на колошнике.

7.3. Оптимизация теплового состояния печи

Ранее было установлено, что главное в управлении собственно доменной печью и параметрами ЗП — это управление тепловым состоянием печи, т.к. в этом случае происходит управление формой, местоположением и толщиной ЗП.

Управление тепловым состоянием печи — это наиболее сложная задача в управлении доменной плавкой. Известно, что для решения любой задачи оптимизации необходим её критерий. В силу особенностей теплообменных и восстановительных процессов по высоте всей печи (от уровня засыпи до чугунной лётки) их два. Ранее [15] было установлено, что критериями теплового состояния печи являются: температура материалов на выходе из «шахты» (шахта, распар, заплечики и верхняя часть горна) печи (t''_2); температура продуктов плавки на выходе из «горна» печи (t''_4) . Наличие двух критериев теплообмена определяется тем, что доменная печь от уровня засыпи до чугунной летки разделена на четыре зоны тепло- и массообмена (рис. 11), в которых процессы идут с разными конечными тепловыми эффектами.

Проведёнными исследованиями было установлено одинаковое влияние каждого из двух критериев



□ - критерии теплового состояния доменной печи
I,II,III,IV - зоны теплообмена
+, (-) - процессы идут с выделением (поглощением) тепла

Рис. 11

теплового состояния печи на форму, местоположение и толщину ЗП, причем в одну и туже сторону: увеличение t''_2 и t''_4 приводило к раскрытию периферии (рис. 8а и рис. 9а) и центра (рис. 8б и рис. 9б), к подъёму ЗП вверх по высоте печи (рис. 8в и рис. 9в) и увеличению её толщины (рис. 8г и рис. 9г).

Вопрос состоит в том, как найти оптимальное положение ЗП? В технической литературе ответа на этот вопрос нет. На рис. 6 представлены зависимости проплава ЖРМ и отнесенного к ним расхода кокса, содержания кремния и серы в чугуне и степени использования СО (определенных автоматическим и ручным способом) от разности значений температуры t''_2 и температуры конца плавления ЖРМ. Из этого рисунка видно, что максимальное производство и минимальный расход кокса достигается тогда, когда величина этой разности составляет ≈ 100 °С. Поскольку принято, что нижняя граница ЗП, соответствующая линии плавления, составляет 1300 °С, то отсюда следует, что оптимальное положение ЗП по производительности печи и расходу кокса достигается тогда, когда значение t''_2 составляет ≈ 1400 °С. Это хорошо видно из рис. 12, на котором представлены зависимости тех же параметров плавки от t''_2 .

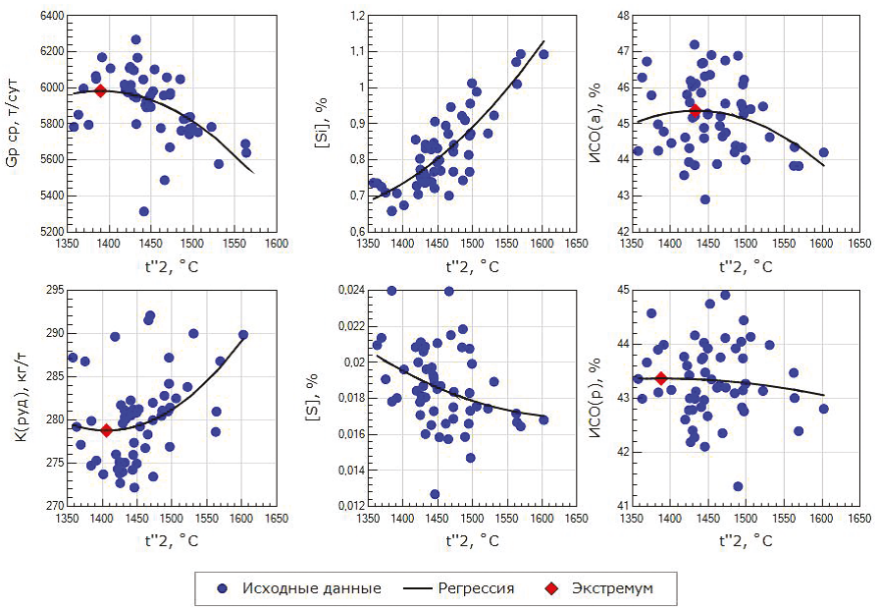


Рис. 12. Зависимость параметров работы ДП2 за сутки с 13.06.2015 по 12.08.2015

Важно подчеркнуть, что зависимость Gp, K(руд) = f (t''_2), определяемая в системе «Нагрев горна», реализованной на всех печах ММК в 2008 г., имеет универсальный характер и справедлива для всех печей доменного цеха ОАО «ММК». Это показывает, что данную зависимость можно использовать для оптимизации теплового состояния печи даже на тех печах, на которых не реализована система «Когезия».

Ранее нами [15] было показано, что для определения и достижения оптимального теплового состояния печи необходимо проводить следующие операции: непрерывный контроль текущих значений t''_2 и t''_4; определение оптимальных значений t''_2 и t''_4: оптимальное значение t''_2 находится из графика типа рис. 12 (отдельно для производства чугуна и расхода кокса); оптимальное значение t''_4, выбирается, исходя из условий стабильной работы печи и дальнейшего передела выплавляемого печью чугуна; сравнение текущих и оптимальных значений t''_2 и t''_4; выбор по величине и знаку разницы между текущими и оптимальными значениями каждого из двух критериев управляющих воздействий по изменению расходов кокса, природного газа (Д) или ПУТ и кислорода (ω) для достижения оптимального теплового состояния печи. Возможные варианты соотношений текущих и оптимальных значений температур материалов на выходе из «шахты» и «горна» печи (табл. 2) и приемы воздействия на текущие значения этих температур для достижения их оптимальных значений описаны в работе [10].

Таблица 2. Приемы воздействий для достижения оптимального теплового состояния доменной печи в зависимости от соотношения текущих и оптимальных значений t''_2 и t''_4

№ вар.	Отношение текущего значения к оптимальному		Факторы, очередность и направление воздействия					Вид воздействия
	t''_2 к $t''_{2опт}$	t''_4 к $t''_{4опт}$	К*)	Д	w	$t_д$	φ	
I	>	>	1 ↓↓↓					сверху
II	<	<	1 ↑↑↑					сверху
III	>	<		3 ↓	2 ↑↑	1 ↑↑↑	4 ↓	снизу
IV	<	>		1 ↑↑↑	2 ↓↓		3 ↑	снизу

Примечание. 1, 2, 3, 4 — очерёдность воздействия в каждом из четырёх вариантов

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ проведённых в мире работ, направленных на контроль и управление зоной плавления железорудных материалов в доменной печи, показал их исключительную важность для повышения эффективности работы и срока службы доменных печей. Представленные материалы подтвердили исключительную важность зоны плавдения для работы доменной печи.

2. Система «Когезия» позволяет проводить постоянный автоматический контроль параметров зоны плавления с помощью разработанной двумерной математической модели (ДММ), максимально полно описывающей процессы по высоте и сечению доменной печи от уровня засыпи до чугунной лётки. Это позволило включить её в состав АСУ ТП доменных печей № 2 и № 10 ОАО «ММК».

3. Функционирование системы позволяет контролировать и количественно оценивать параметры зоны плавления (форму, местоположение и толщину) в реальном масштабе времени и количественно оценивать влияние параметров зоны плавления на конечные показатели доменной плавки.

4. Полученные результаты позволяют обоснованно проводить выбор управляющих воздействий, направленных на повышение эффективности доменной плавки. Наилучшие показатели плавки достигались при следующих значениях параметров зоны плавления: 1) форма: наименьшие значения углов α и β; 2) местоположение: оптимальное расстояние от линии ФО до линии плавления; 3) толщина: наименьшая величина.

5. В результате сопоставления результатов проведенного анализа с зарубежными данными можно сделать следующие выводы.

5.1. Наши исследования подтвердили сделанный в ряде работ вывод о преобладающем влиянии зоны плавления на распределение газового потока и на работу доменной печи.

5.2. Для управления параметрами зоны плавления надо контролировать температурную кривую на колошнике печи и форму зоны плавдления в районе распара и заплечиков печи. При этом не целесообразно открывать периферию. Нет необходимости безмерно открывать центр печи.

5.3. В технической литературе не найдено сведений о количественной оценке параметров зоны плавления. В работе установлены количественные параметры зоны плавления, для них определены оптимальные значения для условий работы конкретной доменной печи и разработаны способы их достижения.

6. Установлено, что главное в управлении собственно доменной печью — это управление тепловым состоянием печи, т.к. в этом случае происходит управление формой, местоположением и толщиной зоны плавления. Ранее было показано, что критериями теплового состояния печи являются: температура материалов на выходе из «шахты» (шахта, распар, заплечики, верхняя часть горна) печи (t''_2)

и температура продуктов плавки на выходе из «горна» печи (t''_4). Установлено влияние каждого из этих двух критериев на форму, местоположение и толщину зоны плавления. Причем в одну и ту же сторону: увеличение t''_2 и t''_4 приводит к раскрытию периферии и центра печи, к подъёму зоны плавления вверх по высоте печи и увеличению её толщины.

7. Система позволяет для каждой печи и её конструктивных, сырьевых и эксплуатационных условий ведения плавки: определять уровень контроля радиальной неравномерности: или распределение температуры на колошнике печи, или форму зоны плавления в распаре печи; оценивать взаимное влияние количественных параметров зоны плавления на конечные показатели доменной плавки и параметров доменной плавки на параметры зоны плавления; проводить выбор управляющих воздействий, направленных на достижение оптимальных параметров зоны плавления. Предложен и обоснован порядок проведения этих операций.

Список литературы

1. В.М. Паршаков. Теплообмен в шахте доменной печи и его влияние на расход кокса. «Повышение производительности и экономичности работы тепловых металлургических агрегатов». Сборник трудов. «Металлургия». М., 1982, с. 49–53.
2. В.М. Паршаков, Ф.Р. Шкляр, О. Л. Голубков. Исследование распределения тепла от окисления металла в фурменных очагах доменной печи между проходящими через них продуктами плавки и газами. «Металлургическая теплотехника». Сборник трудов № 6. М., «Металлургия», 1978, с. 6–9.
3. В.М. Паршаков, Н.М. Бабушкин и П.Б. Федотов. Метод оценки теплового состояния горна доменной печи и его приложение к анализу причин горения фурм. «Сталь», 1980, № 3, с.174–177.
4. V.M. Parchakov, B.A. Bokovikov, F.P. Shklar et al. Mathematical model for the gas flow dynamics and heat and mass transfer processes in the hearth of a blast furnace and its use in the analysis of smelting. «International blast furnace hearth and raceway symposium». Australia, Newcastle, 1981, p.15–1 — 15–6.
5. Паршаков, Ю.В. Яковлев, Г.П. Лежнев и др. Способ теплового регулирования доменной печи. Авторское свидетельство СССР на изобретение № 1246603, 1986 г.
6. В.М. Паршаков, Т.Ю. Каширская, Ф.Р. Шкляр, Б.А. Боковиков и др. Упрощенная модель доменной плавки. «Проблемы автоматизированного управления доменным производством». Выпуск 6. ЦНИИТЭ Приборостроения. М., 1983, с. 26.
7. В.М. Паршаков, В.А. Заболотских, Т.Ю. Каширская. Исследование радиальной неравномерности газодинамических и теплообменных процессов в доменной печи. «Теплотехнические исследования процессов и агрегатов в чёрной металлургии». Сборник трудов. «Металлургия», М., 1986, с. 28–33.
8. В.М. Паршаков, Т.Ю. Каширская, В.А. Заболотских. Двумерная модель теплообмена в доменной печи. «Теплотехническое обеспечение основных технологических процессов чёрной металлургии». Сборник трудов. «Металлургия», М., 1988, с. 22–25.
9. В.М. Паршаков. Повышение эффективности использования пылеугольного топлива в доменной печи. «Сталь», 2005, № 8, с. 32–37.
10. В.М. Паршаков, А.А. Третяк, А.П. Уланов. АСУ ТП доменной плавки и её технологическое насыщение. Доменное производство — XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков. — М.: Издательский дом «Кодекс», 2010. — С. 391–413.
11. V.M. Parchakov, P.B. Fedotov, F.P. Shklar et al. The extent of raceways in a blast furnace and its dependence on combined blast parameterws. «International blast furnace hearth and raceway symposium». Australia, Newcastle, 1981, p. 5–1 — 5–4.
12. В.М. Паршаков, П.Б. Федотов, Н.М. Бабушкин, Г.П. Лежнев. Оценка уровня температуры газа в фурменных очагах доменной печи. «Режимные и конструктивные параметры тепловых металлургических агрегатов». Сборник трудов. «Металлургия», М., 1986, с. 15–17.
13. В.М. Паршаков, Ю.В. Яковлев, Г.П. Лежнев и др. Результаты исследований процессов в печах и воздухонагревателях доменного цеха ММК. «Сталь», 2007, № 2. с. 31–37

14. В.М. Паршаков, Бабушкин, В.Н. Тимофеев. Разработка метода контроля распределения газового потока по радиусу печи. «Теплотехника доменного и агломерационного процессов». «Металлургия». М., 1966, с. 292–305.
15. В.М. Паршаков. Автоматизированная система оптимизации доменной плавки. «Сталь», 2004, № 3, с. 7–13.
16. В.М. Паршаков, Н.М. Бабушкин, Б.А. Боковиков и др. Количество и распределение газового потока в доменной печи и его влияние на показатели плавки. «Сталь», 1971, № 12, с. 1069–107.
17. В.М. Паршаков, Б.А. Боковиков. Исследование влияния изменения порозности слоя шихтовых материалов при увеличении количества дутья на производительность доменной печи. «Металлургическая теплотехника». Тематический отраслевой сборник № 6. М., «Металлургия», 1978, с. 10–13.
18. В.М. Паршаков, В.М. Антонов, Н.М. Бабушкин и др. Выбор и достижение оптимального дутьевого режима доменной плавки. «Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объёма». Тематический отраслевой сборник № 5. «Металлургия». М, 1979, с. 46–49.
19. В.М. Паршаков. Изменение структуры слоя шихтовых материалов в доменной печи при увеличении количества дутья сверх оптимального. «Производство чугуна». Межвузовский сборник. Свердловск, 1981, с. 34–41.
20. В.К. Дурнов. Изучение газодинамики и механики движения сыпучего материала применительно к условиям доменного процесса. Сообщения I — IV. «Тепло — и массообмен в слое и каналах. Теплотехника доменных и теплообменных аппаратах». «Металлургия», М., 1970, с. 23–91.
21. И.Г. Половченко. Движение шихтовых материалов и газов в доменной печи. Металлургиздат, 1958.
22. Л.М. Цылёв Л.М. и др. Известия АН СССР. Металлургия и топливо, 1960, № 2, с. 11–20.
23. Гуденау Г.В., Крайбих Л., Номия Ё. Влияние пластичной зоны на проницаемость столба шихты в доменной печи. — Черные металлы, 1980, № 25/26, с. 7–14.
24. Кутнер С.М. Эксплуатация доменных печей, оборудованных подвижными плитами, за рубежом. — М., 1981. — 40 с. — (Обзорнаяинформ/ Ин-т «Черметнинформация». Сер. Производство чугуна; Вып,1).
25. Курунов И.Ф. Совершенствование технологии и управления доменной плавкой за рубежом. — Черная металлургия, 1981, № 18 (892), с. 18–35.
26. Г.В. Гуденау, К. Крайбих, Н. Иошитака. Зоны когезии и размягчения как распределители газовых потоков в доменной печи. «Черные металлы», 1979, 99, № 22, с. 1204–1211.
27. В.М. Паршаков, А.А. Полинов, А.В. Павлов и др. Повышение эффективности доменной плавки за счет технологического насыщения АСУ ТП доменной печи. Доклад в настоящем сборнике.

Дитер Беттингер, «Primetals Technologies»

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИЯ АГЛОДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

АННОТАЦИЯ

В данной статье представлены достижения и новые разработки в области систем оптимизации процесса для агломерационного и доменного производств, а также дано описание общей системы для координации работы технологических установок, относящихся к производству жидкой фазы продукции на металлургических предприятиях полного цикла.

ВВЕДЕНИЕ

Для того, чтобы стандартизировать и оптимизировать работу аглофабрик и доменных печей, компании Voestalpine Stahl и Primetals уже на протяжении 25 лет совместно работают над созданием систем оптимизации процесса для обоих типов производства.

СТРУКТУРА СИСТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА

Системы оптимизации процесса производства чугуна в своей основе имеют структуру, состоящую из 3-х функциональных уровней, см. рис. 1.

Нижний уровень представляет собой Систему управления данными и информацией процесса, которая отвечает за сбор и проверку достоверности данных, долговременное хранение данных и формирование отчётов. Система управления данными и информацией процесса обеспечивает входные данные для набора моделей процесса. Работающая в режиме замкнутого контура Экспертная Система, расположенная на верхнем уровне, полностью интегрирована в онлайн-систему оптимизации процесса.

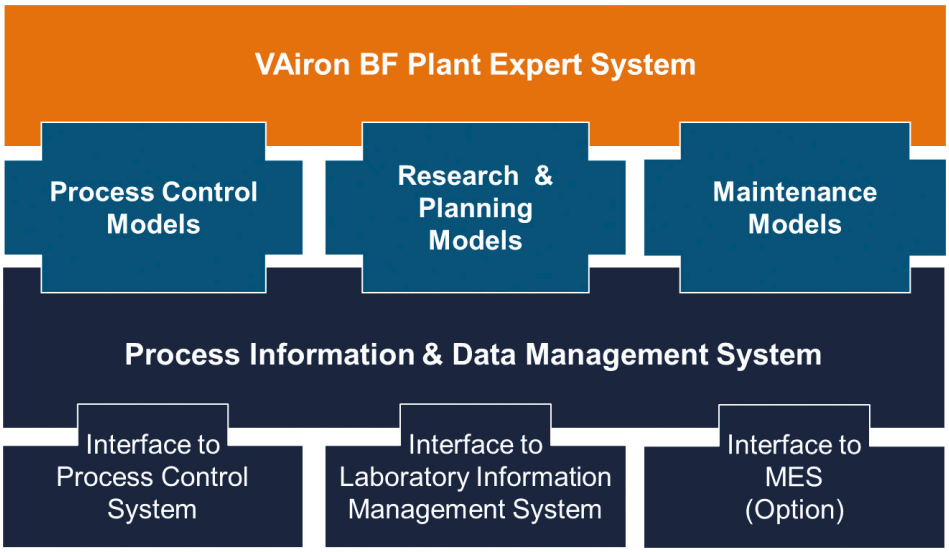


Рис. 1. Структура функциональных уровней системы оптимизации производства чугуна

Система управления данными и информацией процесса

Система управления данными и информацией процесса лежит в основе всех разработанных Primetals Technologies систем оптимизации для производства чугуна и стали. Основные характеристики данной системы:

- Данные, получаемые из широкого спектра источников (интерфейсные сигналы, описание загружаемых материалов, лабораторные данные, производственные данные, события процесса и вычислительные результаты моделей), предварительно обрабатываются функцией сбора данных перед сохранением их в онлайн-базе данных системы оптимизации процесса.

- Дополнительно, данные процесса могут архивироваться в специализированной реляционной базе данных. Таким образом, ключевые данные процесса сохраняются на протяжении всей кампании работы установки.

- Данные графически визуализируются с помощью современных технологий для человеко-машинных интерфейсов (ЧМИ).
- Дополнительно, данные процесса и производственные результаты подготавливаются для анализа руководством предприятия. Отчёты показывают ключевые показатели эффективности соответствующей технологической установки, и могут генерироваться автоматически и по запросу.

На рисунке ниже показан типовой пример основного экрана системы оптимизации процесса для доменной печи.

- Современный «мозаичный» дизаин интерфейсов приложений
- Поддержка использования мобильных устройств
- Возможность индивидуальной настройки экранных отображений.

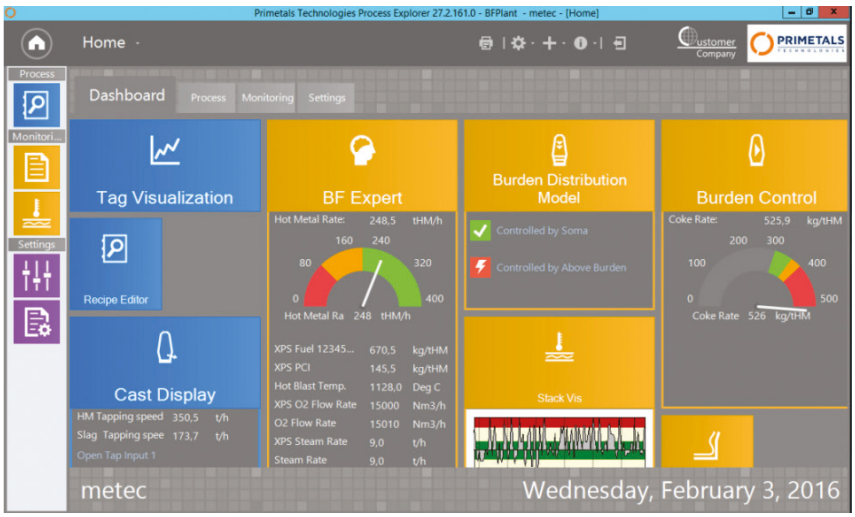


Рис. 2. Пользовательский интерфейс приложения Process Explorer системы оптимизации VAiron

Пакет моделей процессов доменной печи — новейшие разработки

Задачей модели управления шихтой является определение шихтовой композиции, обеспечивающей достижение целевых значений расхода кокса и вдуваемых материалов, основности шлака, качества чугуна и удельного расхода шихты. Вместе с экспертной системой модель управления шихтой является основой для управления шихтой в режиме замкнутого контура. Технологи и операторы задают целевые значения (например, температуру чугуна, Si, S и основность шлака), необходимые для оптимальной работы, а также постоянные (постоянное значение в кг/т. чугуна) и переменные материалы для управления шихтой.

Новой особенностью в модели распределения шихты является вычисление распределения шихты по химсоставу. На рис. 3, на верхнем экране показан расчёт слоёв кокса и шихты, а на нижнем экране показаны соответствующие графики расчётного анализа компонентов по радиусу печи. Можно видеть, что основность шихты (компонент B2_P) резко повышается в зоне от центра печи к стенке.

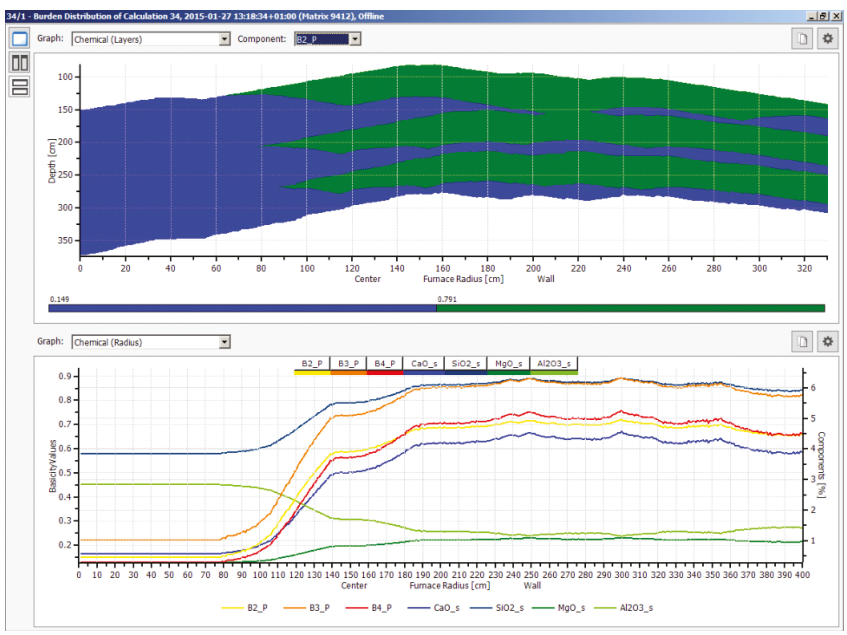


Рис. 3. Модель распределения шихты с расчётом распределения шихты по химсоставу

Доменная печь: Модуль выбора матрицы

Система оптимизации работы доменной печи Vairon BF сохраняет историю активированных матриц загрузки (материал и распределение) в базе данных процесса. Вместе с матрицами Модуль выбора матрицы оценивает следующие данные за период активации:

- Структура засыпи с точки зрения типа материала (например, агломерат %, окатыши %, руда % и т.д.), среднего удельного расхода кокса.
- Средний расход вспомогательного топлива через фурмы с учётом длительности производственного цикла доменной печи.
- Средняя температура чугуна с учётом длительности производственного цикла доменной печи.
- Среднее содержание Si в чугуне с учётом длительности производственного цикла доменной печи.

Технолог или оператор имеет возможность ввести определенную структуру засыпи (агломерат %, окатыши %, руда %) и определить наилучшее распределение шихты (рис. 4). Алгоритм пробует найти оптимальное распределение шихты с точки зрения общего расхода топлива и с учётом предельных значений температуры чугуна и содержания Si. В результате технолог получает наилучшую матрицу с расходами топлива и параметрами качества чугуна, которую можно отправить в систему базовой автоматизации для активации.

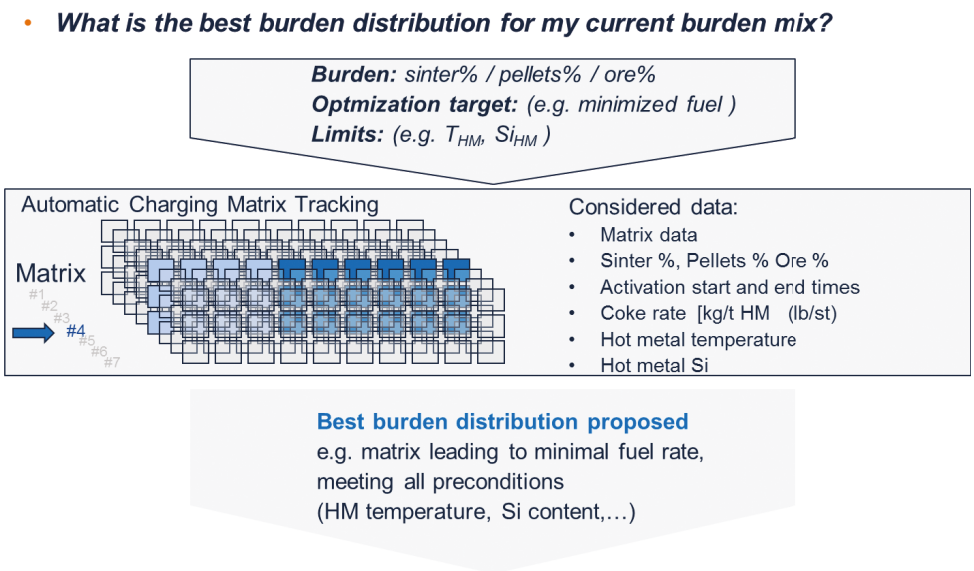


Рис. 4. Модуль выбора матрицы для определения оптимального распределения шихты

Работающая в режиме замкнутого контура Экспертная Система — современное решение

Задачи экспертной системы:

- установить диагноз в отношении состояния технологической установки
- предложить корректирующие воздействия, если потребуется
- пояснить причины, лежащие в основе диагноза и терапии

Основное отличие работающей в режиме замкнутого контура экспертной системы от рекомендательной системы заключается в автоматическом и одновременном исполнении корректирующих воздействий, когда это необходимо. Например, если необходимо изменить расход кокса, то это также повлияет на содержание кремния в чугуне. Поэтому данное изменение потребует одновременно изменения основности шихты. Такие комплексные действия, особенно когда система занимается тонкой настройкой процесса и выполняет множество незначительных воздействий, не могут выполняться в процессе взаимодействия между оператором и рекомендательной системой. Следовательно, работающая в режиме замкнутого контура экспертная система поддерживает стандартизированный характер работы и позволяет снизить производственные издержки.

На рис. 5 ниже показана структура работающей в режиме замкнутого контура экспертной системы от компании Primetals.

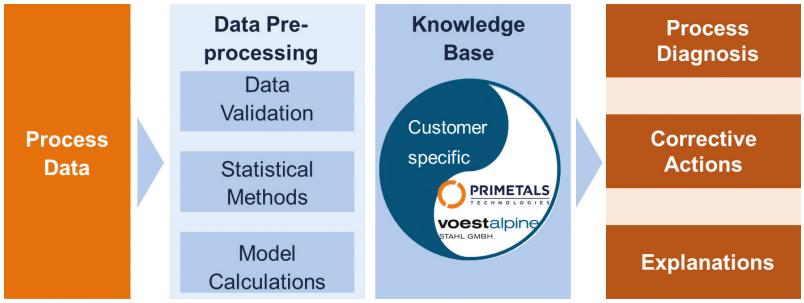


Рис. 5. Структура реализации работающей в режиме замкнутого контура экспертной системы от компании Primetals

Прежде чем выдать диагностические оценки и корректирующие воздействия, выполняются расширенная предварительная обработка данных и вспомогательные вычисления. Это включает в себя модельные расчёты высокой сложности, которые являются предварительными результатами соответствующих модулей экспертной системы. Примером сложных модельных расчётов является расчёт изменения содержания SiO_2 в шлаке доменной печи из-за изменения температуры чугуна и, таким образом, содержания Si, что является промежуточным результатом корректирующего воздействия по изменению основности шлака экспертной системой доменной печи от компании Primetals.

Диагностические оценки устанавливаются с использованием нечёткой логики и традиционной (основанной на правилах) технологии экспертных систем.

Результаты диагностических оценок графически визуализируются на главном экране экспертной системы Primetals с помощью определенной системы светофоров, где красная, жёлтая и зелёная зоны для результатов диагностических оценок характеризует очень низкий и очень высокий, низкий и высокий, и нормальный уровень соответственно. Кроме того, подробное описание входных данных и результатов каждой диагностической оценки содержится в окне журнала обзора процесса экспертной системы как часть общего пояснения.

Корректирующие воздействия представляют собой предложения оперативному персоналу изменить некоторые параметры процесса (уставки). Пояснения описывают рекомендации, чтобы операторы могли понять, почему было предложено определенное корректирующее воздействие.

Предложенные корректирующие воздействия должны быть подтверждены оператором. Операторы должны вводить причину на графическом интерфейсе пользователя, если они не следуют предложениям экспертной системы, и, таким образом, исключают исполнение этих корректирующих воздействий. Введенные причины отказа от определенных предложений являются основой для настройки экспертной системы в оффлайн-режиме.

Типовые корректирующие воздействия для экспертных систем аглофабрики и доменной печи показаны на рис. 6 ниже.

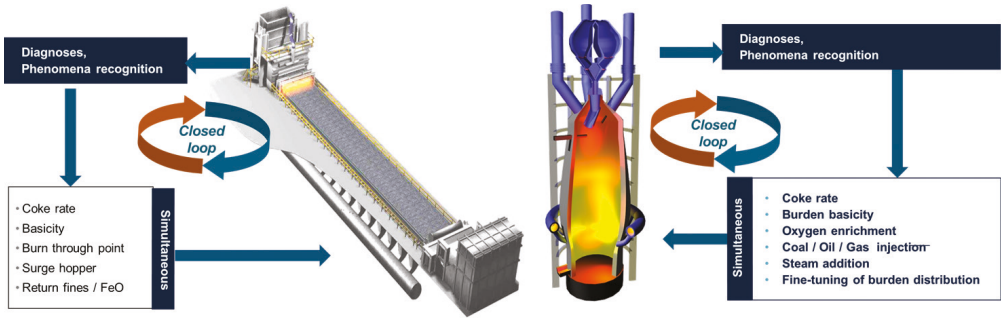


Рис. 6. Типовые корректирующие воздействия для экспертных систем аглофабрики и доменной печи с управлением в режиме замкнутого контура

РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРОЕКТЫ СИСТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА

На протяжении последних 25 лет системы оптимизации VAiron были установлены по всему миру на 73 доменных печах и 36 аглофабриках. Внутренний объем этих доменных печей варьировался от 1270 м^3 до 5800 м^3.

Годовой объем чугуна, производимого на доменных печах, оборудованных системами оптимизации компании Primetals, достигает приблизительно 150 млн т. Согласно информации «Всемирной ассоциации производителей стали», в 2015 г. общий объем производства чугуна в доменных печах составил 1153 млн т.

Полезные эффекты и экономия

Чем раньше будут выявлены отклонения от оптимальных условий работы, тем раньше могут быть инициированы контрмеры и тем устойчивее будет работа технологической установки, производящей чугун. Более того, такое ранее распознавание явлений позволяет применять незначительные корректирующие воздействия вместо «тяжелых» воздействий. За время типового цикла в пять минут экспертная система проверяет следующее:

- несколько сотен точек измерений из базовой системы автоматизации, и
- соответствующие модельные расчёты для состояний внутренних процессов, которые не могут быть измерены непосредственно.

Достигаемая в результате устойчивая работа доменной печи, при которой исключаются «тяжелые» управляющие воздействия и критические ситуации процесса, обеспечивает следующее:

- повышение эксплуатационной готовности оборудования,
- увеличение срока службы оборудования, и
- уменьшение объема технического обслуживания и затрат

Эксплуатационные показатели, достигаемые с помощью Экспертной Системы, работающей в режиме замкнутого контура

В дополнение к полезным эффектам, перечисленным выше, Экспертная Система VAiron для доменных печей, а также для аглофабрик, обеспечивает следующие непосредственные выгоды:

- сокращение удельного расхода топлива,
- повышение производительности доменной печи,
- стабильное качество продукта даже при использовании более дешевого, с более низким качеством сырья.

В таблице ниже показана экономия расхода топлива, достигнутая за счет применения работающей в режиме замкнутого контура экспертной системы в различных проектах по всему миру. В перечисленных проектах доменные печи характеризуются широким диапазоном рабочих объемов и расходов топлива.

Таблица 1. Достигнутая экономия топлива в период гарантийных испытаний при использовании работающей в режиме замкнутого контура Экспертной Системе

Регион	Установка №	Диапазон рабочего объёма	Расход топлива до использования Экспертной Системы	Достигнутая экономия в период гарантийных испытаний
Европа	1	1 500 — 2 000 м^3	455 кг/т чуг.	5.1 кг/т чуг.
	2	4 000 — 4 500 м^3	460 кг/т чуг.	5,5 кг/т чуг.
	3	2 000 — 2 500 м^3	468 кг/т чуг.	7,9 кг/т чуг.

Продолжение табл. 1

Регион	Установка №	Диапазон рабочего объёма	Расход топлива до использования Экспертной Системы	Достигнутая экономия в период гарантийных испытаний
СНГ	4	2 500 — 3 000 м³	495 кг/т чуг.	9,8 кг/т чуг.
	5	2 000 — 2 500 м³	500 кг/т чуг.	15,1 кг/т чуг.
	6	1 500 — 2 000 м³	535 кг/т чуг.	11,2 кг/т чуг.
Азия	7	2 000 — 2 500 м³	524 кг/т чуг.	8,1 кг/т чуг.
Африка	8	2 000 — 2 500 м³	509 кг/т чуг.	14,7 кг/т чуг.
Индия	9	1 500 — 2 000 м³	510 кг/т чуг.	5,3 кг/т чуг.

Комплексная система управления производством чугуна

Комплексная система управления производством чугуна — это недавняя разработка компании Primetals совместно с заводом Voestalpine Stahl, Линц. Задачей данной разработки является создание автоматизированной системы управления производством для различных технологических установок (например, коксовые батареи, склад сырья, аглофабрики, доменные печи), задействованных в процессе производства чугуна.

Надстраиваемая экспертная система обеспечивает оптимальную координацию работы взаимодействующих технологических установок. Таким образом, вместо независимых оптимизаций отдельных технологических установок, что во многих случаях не является наилучшим решением, осуществляется общая оптимизация всей технологической цепочки. Такой подход имеет ряд преимуществ:

- Прозрачность и прослеживаемость производственных решений;
- Оптимизация всей технологической цепочки вместо независимых отдельных оптимизаций;
- Снижение затрат и увеличение производительности.

Координация управления производством осуществляется экспертной системой, которая учитывает фактические отклонения и оценивает производительность, обеспечивая в результате оптимальные производственные уставки. Исходя из требований к чугуну со стороны технологических установок, производящих сталь, задаются показатели производительности и качества для технологических установок первых переделов.

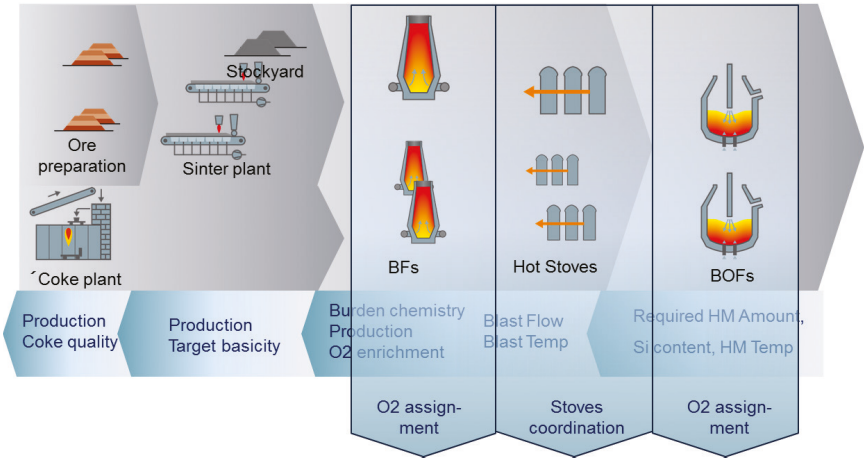


Рис. 7. Схема комплексной системы управления производством чугуна

Например, для каждой доменной печи определяются «рабочие точки» (с точки зрения выхода чугуна, количества дутья и кислорода, и расхода топлива), которые затем используются при отдельной оптимизации. Аналогичным образом определяются «рабочие точки» для аглофабрик и коксовых батарей.

Кроме того, осуществляется координация времени переключения воздухонагревателей для минимизации влияния на давление в общезаводской газовой сети.

Благодаря централизованному сбору данных могут быть сформированы и переданы в информационную систему управления (ERP, SAP и т.д.) ключевые показатели эффективности (КПЭ) для всего участка производства чугуна.

На рисунке ниже показан главный экран Комплексной системы управления производством чугуна. В верхней части экрана отображаются соответствующие результаты диагностических оценок, в средней части экрана представлены графики технологических параметров (например, сравнение уставки с фактическим количеством тонн агломерата на складе шихтовых материалов), а в нижней части экрана перечислены корректирующие воздействия.

Рис. 8. Пользовательский интерфейс Комплексной системы управления производством чугуна — модуль «Комплексное управление аглопроизводством»

С.А. Денисов, ООО «КОНВЕЛС Автоматизация»

СИСТЕМА ELMAN ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМИРОВАНИЕМ ПОДАЧ И РЕЖИМОМ ДУТЬЯ ПУТ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ХОДА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПОТОЧНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА

ВВЕДЕНИЕ

Доменное производство характеризуется большими объемами перерабатываемого сырья, поставляемыми из разных источников, и значительной инерционностью процесса доменной плавки.

Для оптимизации процесса доменной плавки разработаны многочисленные математические модели, описывающие физико-химические преобразования, проходящие в доменной печи, с высокой степенью достоверности, успешно применяемые в ряде доменных производств. Данные модели обобщают данные, получаемые с контрольно-измерительных приборов, и сообщают обслуживающему персоналу информацию о ходе технологического процесса, а также о необходимых корректирующих воздействиях.

Однако при корректировании режимов подач доменной шихты и дутья персонал не располагает точными данными о качественных и количественных характеристиках подаваемых партий материала. Единственная информация о составе загружаемых компонентов шихты доступна с помощь лабораторного анализа отобранной пробы материала или из паспорта партии. Данные способы не отслеживают колебания компонентов шихты от подачи к подаче, не обеспечивая возможности точно определять состав каждой конкретной подачи.

Схожее затруднение наблюдается при вдувании пылеугольного топлива в доменную печь. Отсутствие точной информации о качестве

угля не позволяет управлять дутьем так, чтобы направлять в домну то количество угля, которое необходимо в конкретный момент учитывая колебания теплотворной способности. Для стабилизации технологического процесса обслуживающий персонал вынужден выбирать такие режимы работы, которые позволили бы нивелировать возможные колебания параметров, приводящие к аварийным ситуациям. Данные режимы основаны на обеспечении запаса топлива в доменной печи.

Возможность измерять элементный состав всего объема топлива, поступающего на вдувание, позволит с высокой точностью рассчитать колебания теплотворной способности на несколько часов вперед. Подобная измерительная система может снабжать обслуживающий персонал необходимыми данными о качестве поступающего в печь ПУТ и позволит оперативно поддерживать тепловой баланс печи с меньшим запасом расходуемого кокса.

Стоит отметить, что использование поточных систем для измерения состава постигаемых в доменную печь материалов и систем управления формированием подач и режимов дутья на их основе наиболее эффективно работают в паре математическими моделями доменной плавки, предоставляя этим моделям точную информацию о составе загружаемого материала, а так же требования для формирования новых подач.

Для обеспечения непрерывного измерения качества материалов, поступающих в доменную печь, ООО «КОНВЕЛС Автоматизация» разработало систему управления материальными потоками «ElMan», с помощью которой возможно точно измерять состав каждой партии загружаемого в доменную печь шихтового материала и вдуваемого пылеугольного топлива (ПУТ).

ПРИНЦИП РАБОТЫ СИСТЕМЫ ELMAN

Система управления материальными потоками ElMan предназначена для непрерывного измерения качественных и количественных характеристик потоков доменного сырья, поступающих в бункерную эстакаду, и стабилизации качества доменных подач путем управления дозаторами.

Элементы системы ElMan измеряют и определяют в режиме реального времени следующие параметры сыпучих материалов:

- Элементный состав;
- Влажность;
- Насыпная плотность;
- Гранулометрический состав;
- Массовый расход материалов;
- Регистрация отклонений от технологического процесса.

Измерения параметров проводятся в режиме реального времени, за счет чего достигается непревзойденная чувствительность к изменениям свойств поступающего потока материала и оперативность управления технологическим процессом для устранения неоднородности материалопотока.

Стоит отметить, что модуль определения элементного состава проводит измерение по всей толщине насыпи вне зависимости от гранулометрического состава компонентов шихты.

Результаты измерений обрабатываются математической моделью, которая в режиме реального времени рассчитывает распределение материалов по бункерам с учетом перемешивания, вырабатывает оптимальные режимы работы дозаторов и прогнозирует качество подач на несколько часов вперед. Основываясь на этих вычислениях, Система ElMan способна регулировать интенсивность подачи компонентов дозирующим оборудованием с целью обеспечения стабильного состава подач.

Оценка эффективности внедрения системы ElMan проводится на основе имеющихся отчетных данных производства путем обработки их в математической модели управления шихтоподготовкой. Для получения достоверных данных модель калибруется с учетом особенностей конкретного производства. Затем рассматривается отработка системой нового алгоритма управления с учетом всех поточных данных и проводится сравнение технологии управления, реализованной на предприятии с возможностями, предоставляемыми ElMan.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ELMAN

Принцип действия системы заключается в том, что благодаря использованию поточных методов контроля качества поступающих материалов, математическая модель обладает данными для прогнозирования качества материала, находящегося в бункерах в любой момент времени. Алгоритм управления рассчитывает необходимые расходы через питатели для стабилизации качества подач материалов, формируемых на выходе с бункерной эстакады. На основе полученных результатов программное обеспечение формирует управляющие сигналы для дозаторов.

Для первоначальной оценки эффективности использования системы ElMan при применении на бункерной эстакаде необходимо смоделировать процесс ее работы. Для проведения подобного расчета использовались следующие данные:

- Материалы технологической инструкции доменного цеха;
- Отчеты о составе сырья доменной печи;
- Отчеты о химическом составе окатышей.

Из технологической инструкции использовались данные по количеству и объему бункеров в бункерной эстакаде шихтовых материалов; объем и масса партий материалов, загружаемых в печь; свойствах используемого сырья и т.д.

Основная сложность заключается в том, что имеющиеся данные по качественным характеристикам представлены либо средними значениями, либо с большим шагом по времени. Например, данные химического анализа окатышей остаются неизменными с 01.06.2015 по 15.06.2015, т.е. на протяжении двух недель, а затем остаются постоянными на протяжении еще большего срока — с 15.06.2015 по 14.08.2015. Очевидно, что при таких скудных данных отслеживать и стабилизировать колебания свойств шихты невозможно. Наиболее часто представлены данные о химическом составе агломерата. Поскольку оценкой эффективности работы является изменение разброса значений химического состава подачи материала до и после бункерной эстакады, то для оценки эффективности системы будем использовать именно данные по агломерату. Оценка проводилась по содержанию железа, как наиболее важного компонента в составе аглошихты. Очевидно, что при необходимости также можно учитывать и другие компоненты.

Данные об изменении содержания железа в агломерате за период с 01.05.2015 по 01.06.2015 представлены на рис. 1.

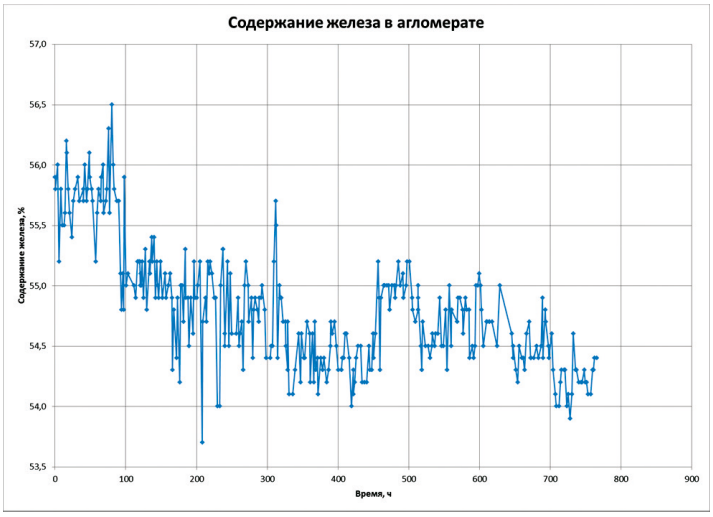


Рис. 1. Изменение содержания железа в агломерате от времени

На рис. 1 можно видеть определенные участки, на которых значительно изменяется среднее значение железа. Соответственно, чтобы получить адекватные статистические результаты, будем рассматривать период, в течение которого среднее значение не подвергалось значительным изменениям — примерно с 100 ч по 310 ч.

Поскольку данные о составе агломерата по-прежнему достаточно редки (раз в 1–3 часа), а согласно технологической инструкции, в час должно формироваться около 4 подач в доменную печь в час, то предположим, что состав агломерата между отборами проб меняется линейно (именно так данные представлены на рис. 1).

Одним из важнейших компонентов системы ElMan для бункерной эстакады является алгоритм управления дозаторами. Алгоритм учитывает состав и порядок материалов, попадающих в бункерную эстакаду, и проводит их анализ с учетом поставленного критерия. Поскольку целью управления является стабилизация состава подач, критерием управления было выбрано поддержание постоянного значения содержания железа в подачах, равного 55%.

Стоит отметить, что среднее значение железа в агломерате за рассматриваемый при расчете период составляет 54.9%, а задание для системы ElMan специально выбрано равным 55%. Это сделано намеренно, с целью усложнения задачи для алгоритма управления и проверки его эффективности работы в критических условиях, когда качество поступающего материала не соответствует заданию.

Оценка эффективности проводится исходя из сравнения интервалов колебаний содержания железа в подачах без учета использования системы ElMan (т.е. без учета управления дозаторами) и с учетом применения системы ElMan (в том числе уникального алгоритма управления, используемого в ней).

Отдельно стоит отметить, что в бункерной эстакаде также происходит усреднение материалов, которое также учитывается системой ElMan. Но поскольку для учета усреднения необходимо иметь подробные данные о геометрии бункеров, влажности и гранулометрическом составе шихтовых материалов, а также других параметрах, то в данном расчете использовалась упрощенная модель — усреднение материалов реализовано через фильтр скользящего среднего значения. Отдельно отметим, что данное усреднение одинаково учитывалось как для случая работы без системы ElMan, так и при работе с системой, что позволяет непосредственно оценить вклад от наличия управления.

Оценивая зависимости изменения химического состава агломерата от времени, можно сделать вывод, что в данном случае удобно и наглядно будет для проведения подобных оценок использовать статистические характеристики, такие как математическое ожидание и стандартное отклонение.

Результаты

Результаты моделирования процесса образования подач для доменной печи с учетом и без использования системы ElMan приведены на рис. 2.

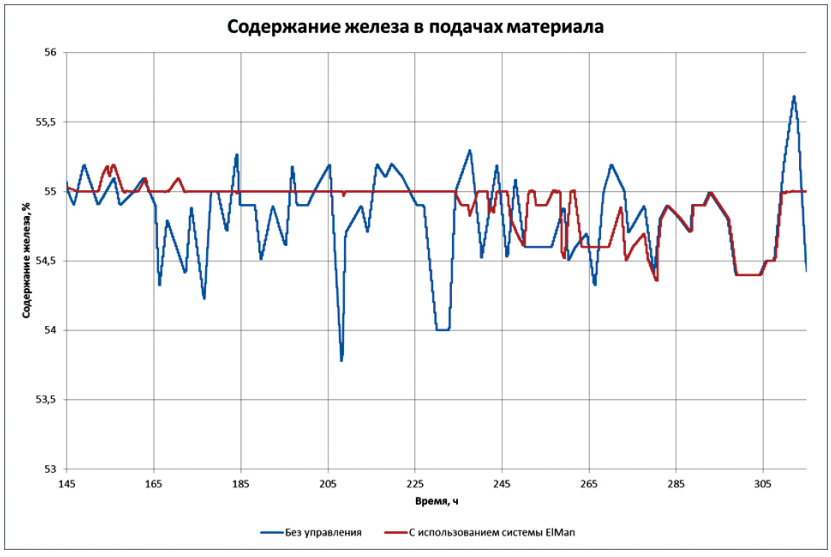


Рис. 2. Изменение содержания железа в подачах агломерата от времени

На рис. 2 можно видеть, что система ElMan значительно сокращает колебания содержания железа в агломерате. Алгоритму управления удается стабилизировать содержание железа в подачах до тех пор, пока содержание железа в поступающем в эстакаду материале не падает ниже установленного задания в 55%, что можно наблюдать с 245-го часа работы. При снижении среднего содержания железа в поступающем агломерате ниже заданного значения, падает и среднее содержание железа в подачах. Как только среднее содержание железа в поступающем в бункерную эстакаду агломерате падает ниже задания, то в бункерах просто нет богатого железом материала, очевидно, и содержание железа в подачах падает. При этом алгоритм по-прежнему пытается отработать задание — с 309 часа можно наблюдать, что как только в бункерную эстакаду стал поступать агломерат с большим содержанием железа, алгоритм начинает его использовать для формирования подач с содержанием в 55%.

Соответственно, при выявлении ситуаций, когда сырье не соответствует заданию, система ElMan может быть использована различными способами:

- система сигнализирует о появлении критической ситуации;
- система может автоматически рассчитать и рекомендовать новое задание (например, понизить содержание до 54.5%);
- система может поддерживать установленное значение содержания компонента, используя другие шихтовые материалы (например, окалину).

Итоговые характеристики процессов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение данных о содержании железа в подачах и без использования управления дозаторами бункеров и с использованием системы ElMan

	Среднее содержание Fe в подачах	Стандартное отклонение	Максимальное содержание железа в подаче	Минимальное содержание железа в подаче
Без управления	54.82	0.283	55.69	53.78
С использованием системы ElMan	54.90	0.182	55.19	54.36

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПУТ, ВДУВАЕМОГО В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ

Стабилизация работы фурменной зоны является важным мероприятием для обеспечения стабильности доменной плавки. Использование системы ElMan для формирования подач ПУТ позволяет измерять состав угольного топлива по всему объему, поступающему в бункера. Измерение состава угля, поступающего на линию подготовки, позволяет на несколько часов вперед прогнозировать состав ПУТ, непосредственно подаваемого в ДП.

Важнейшим элементом системы является анализатор элементного состава, который позволяет проводить прямое измерение состава по всем элементам угля — C, H, O, Si, Fe, Ca, Mg, P, S, N, Mn, Al, Na, K, Cl, Ti. Совместно с элементным анализом проводится также измерение гранулометрического состава приходящего в доменный цех угля, что дает возможность реализовать качественный контроль ПУТ по теплосодержанию, содержанию летучих и зольности даже в условиях многокомпонентной топливной смеси.

С помощью математического моделирования поведения и взаимодействия сыпучих сред в геометрии оборудования, в точности повторяющего технологический участок подготовки ПУТ, осуществляется управление смешением углей в бункерах и их подача для максимального соответствия заданию и для минимизации колебаний состава ПУТ, подаваемого в ДП.

Использование модели движения угля от момента засыпки в приемный бункер до момента его вдувания в фурменную зону позволяет прогнозировать состав ПУТ, подаваемого в печь на несколько часов вперед. Информация о составе угля позволяет рассчитать теплотворную способность каждой порции вдуваемого ПУТ. Данная информация облегчит обслуживающему персоналу работу по поддержанию теплового баланса печи.

Система стабилизации вдувания ПУТ также учитывает геометрию подвода пылегазовую смесь и режимы подачи.

Параллельное внедрение системы формирования подач и системы стабилизации вдувания ПУТ позволяет в режиме реального времени осуществлять контроль элементного состава всех поступающих в доменную печь материалов и обеспечить обслуживающий персонал необходимой информацией для стабилизации хода доменной плавки, а также расчёт влияния поступающего в цех материала на ход доменной плавки в будущем

ВЫВОДЫ

Стоит отметить, что несмотря на то, что проведение расчета было основано на данных о разбросе агломерата, а не всех шихтовых материалов, итоговый эффект будет иметь такой же характер. Это объясняется тем фактом, что для каждого шихтового материала имеются свои бункера. Влияние качества агломерата будет наиболее значительным, поскольку его содержание в доменных подачах больше, чем любого другого компонента.

В итоге можно сделать следующие выводы:

- Использование системы ElMan позволяет снизить разброс содержания железа в доменных подачах с ±0.55 до ±0.35 (доверительные интервалы 2σ).
- Система ElMan способна управлять любым количеством бункеров и стабилизировать любое количество химических компонентов и их производных (не только Fe, но также Cao, MgO, SiO_2, основность, Al_2O_3 и др.).
- Система способна определять наличие критических ситуаций, когда поступающее сырье не соответствует заданию, сигнализировать об этом операторам, а также предлагать возможные пути решения данных проблем (изменение долей компонентов).
- Совместное использование систем управления формированием подач и управления вдуванием ПУТ позволяет стабилизировать качество сырья, поступающего в доменную печь
- Использование систем управления формированием подач и управления вдуванием ПУТ при совместной работе с математической моделью доменного процесса закрывает полный спектр задач по формированию доменных подач — получая необходимую информации о сырье, поступающем в доменную печь появляется возможность формировать оптимальные подачи на основе анализа текущего состояния доменного процесса.
- На основании ряда исследований зависимости колебаний состава агломерата от колебаний состава компонентов агломерационной шихты на различных металлургических предприятиях РФ показано достижимое снижение диапазона колебаний основности путём внедрения поточного анализа позволит снизить диапазон колебаний содержания железа в агломерате на 0,16% (абс.) (с ±0,9% (масс.) до ±0,74% (масс.)), а также снизить диапазон колебаний содержания FeO в агломерате на ±0,5% (абс.). Кроме того, ожидается увеличение производительности агломашин и уменьшение удельного расхода твёрдого топлива, однако, численная оценка этих эффектов затруднена.

П.П. Богданов, ООО «КОНВЕЛС Автоматизация»

БЕСКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА КОНТУРОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ПАССИВНОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ

ОПИСАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ПОЛОЖЕНИЯ

До середины XX века вопросам охлаждения металлургических печей не уделяли должного внимания. Это объясняется тем, что все вопросы охлаждения металлургических печей решались металлургами и специалистами промышленного водоснабжения раздельно, а не комплексно.

В современной металлургической печи ряд ответственных конструктивных элементов находится в зоне высоких температур. Поэтому их надежная работа зависит от качества огнеупорных материалов, конструкций, стойкости охлаждающих элементов и возможна только при правильном охлаждении. Система охлаждения существенно влияет на конструкцию печи и ее долговечность.

Выбор подходящих огнеупоров и систем охлаждения в каждой отдельной зоне доменной печи играет решающую роль для успешного, экономичного и, прежде всего, безопасного производства чугуна. Огнеупорные материалы, применяющиеся для футеровки пода доменной печи, определяют, как правило, продолжительность кампании печи. Правильные подбор материалов, спецификация, инспекция и установка играют решающую роль для обеспечения надежной работы пода печи. Система охлаждения доменной печи является важным компонентом для обеспечения сверхдлинной кампании печи.

Контур охлаждающей воды служит для защиты как кожуха печи, так и отдельных водоохлаждаемых элементов. Замкнутые напорные контуры охлаждающей воды с принудительной рециркуляцией и обработкой воды обеспечивают работу контура. В контуре охлаждения для

наиболее безопасной и продолжительной эксплуатации домны необходимо поддерживать определенные параметры, такие как:

- Оптимальный объемный расход;
- Оптимальная температура воды;
- Отсутствие примесей;
- Отсутствие утечек;

Ввиду того, что трубопроводы систем охлаждения находятся в зоне высоких температур, то присутствует риск их прогорания. Точное выявление утечек в системах охлаждения печи является важным аспектом для обеспечения успешной эксплуатации и безопасности печи в течение длительной эксплуатации.

При разгерметизации контура охлаждения возможно попадание охлаждающей воды в домну, либо попадание газообразных продуктов реакции в контур охлаждения. При отрицательной разнице давлений между давлением в трубопроводе и внутри домны, на уровне точки разгерметизации, газы из домны попадают в охлаждающий трубопровод. Для детектирования подобных случаев в замкнутые контуры охлаждения обычно входит расширительный резервуар, в котором устанавливается датчик углекислого газа, сигнализирующий о его разгерметизации. Также на некоторых предприятиях используют системы фиксации пузырьков газа индикатором излучения при пропускании светового потока через отходящую охлаждающую фурму воду (авт. свид. 836105, 1981, С 21 В 7/24), а также фиксация пузырьков газа при пропускании электрического тока через охлаждающую воду на выходе воздушной фурмы (авт. свид. СССР 831791, 1981, С 21 В 7/24).

В случае если давление в домне меньше, чем в трубопроводе охлаждения, жидкость из контура попадает в домну, при этом объемный расход жидкости на выходе из холодильника оказывается меньше, чем на входе. Для детектирования подобных случаев на производстве применяется метод с установкой расходомеров на концах линий охлаждения, для сравнения параметров объемного расхода и сигнализации утечки.

Проблемой данных систем является их невысокая надежность и инвазивные сенсоры, которые также и сами могут быть источником утечки. Для монтажа/демонтажа или поверки сенсоров может быть необходима разгерметизация контура охлаждения, что снижает надежность системы.

Раздельное использование способов, таких как измерение расхода на подаче и выходе с холодильника и детектирование попадания газовой фазы в охлаждающую жидкость не всегда обеспечивает надежную регистрацию разгерметизации холодильника. На некоторых уровнях охлаждения в домне значение давления в процессе плавки и слива чугуна может изменяться в пределах, в которые попадает значение давления в охлаждающем трубопроводе, то есть может произойти как попадание газовой фазы в контур, так и воды в домну, что делает раздельное применение методов по определению загазованности охлаждающей жидкости и по разнице расходов неэффективным.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ, ОСНОВАННОЙ НА ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ ДАТЧИКАХ

Одновременное измерение объемного расхода хладагента и количества присутствующего в жидкости газа в контурах охлаждения доменной печи с помощью принципов гидролокации является наиболее современным и надежным методом детектирования разгерметизации контура.

Гидролокационный принцип берет свое начало в сонарах подводных лодок, однако на данный момент его преимущества доступны и для промышленной автоматизации. Современные разработки позволяют использовать принципы гидролокации для определения таких параметров, как:

- объемный расход;
- скорость потока;
- доля вовлеченного воздуха;
- объемный расход жидкости, скомпенсированный по вовлеченному воздуху.

Технология гидролокации исключает влияние множества факторов на погрешность измерения, таких как наличие в потоке газовой составляющей, изменение плотности, вязкости, электропроводности и т.д., позволяя получать точные данные о расходе самых различных технологических жидкостей без контакта с измеряемой средой.

В отличие от ультразвуковых расходомеров, которые также являются накладными, сенсоры гидролокационного расходомера не требуют постоянного ухода и замены контактного геля, а в случае появления отложений на внутренних стенках труб измерение скорости потока продолжается без внесения дополнительных погрешностей, так как внутренний диаметр трубопровода может быть введен в прибор как функция от времени.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДАТЧИКОВ СИСТЕМЫ

Массив из восьми пассивных пьезоэлектрических элементов используется для детектирования звуковых волн, которыми сопровождается ток жидкости в трубопроводе. Турбулентные вихри, возникающие в трубопроводе в ходе течения жидкости, проходят через матрицу сенсоров и на каждом сенсоре регистрируется звуковой сигнал, возникающий при перемещении вихрей. Сигнал, с помощью встроенного в крышку сенсора предусилителя, усиливается и передается в блок аналого-во-цифровых преобразователей. После оцифровки сигнала данные обрабатываются для анализа и сопоставления параметров с каждого из восьми элементов сенсора (Рис.1).

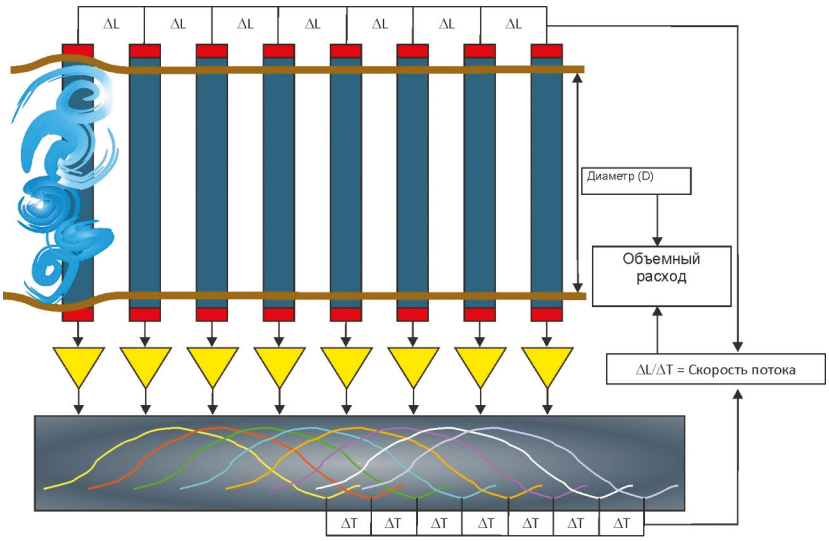


Рис. 1. Принцип работы датчиков системы

ПО выделяет из общего звукового поля данные о когерентных частях звукового спектра, имеющих пики по амплитуде на сенсорах через определенные периоды времени. Данные пики анализируются по форме сигнала и ПО выделяет пики, соответствующие перемещению отдельных вихрей по трубопроводу. Так как отслеживается множество перемещений турбулентных вихрей, то финальный массив данных по скорости их перемещения позволяет вычислять объемный расход с высокой точностью.

ИЗМЕРЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОВЛЕЧЕННОГО ВОЗДУХА

Измерение содержания вовлеченного воздуха осуществляется с помощью измерения скорости звука в трубопроводе. При этом не требуется никаких дополнительных излучателей звука — высочайшая чувствительность сенсора позволяет проводить измерения скорости прохожде-

ния естественно возникающих в потоке звуковых волн, распространяющихся в обе стороны трубопровода.

Скорость звука в жидкости напрямую коррелирует с содержанием газовой фазы и, измерив скорость звука, система вычисляет содержание газовой фазы в потоке. Если давление в трубопроводе изменяется в широких пределах, то, для компенсации влияния давления в систему может быть подан сигнал с внешнего датчика давления.

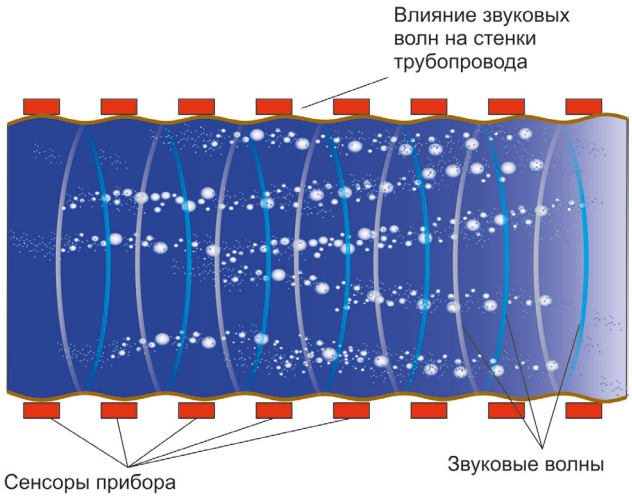


Рис. 2. Измерение вовлеченного воздуха

ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОКАЦИОННОГО ПРИНЦИПА

Данные об истинном газосодержании не только значительно повышают точность и воспроизводимость измерения объемного расхода, но также и позволяют контролировать процесс образования газожидкостной среды в системах испарительного охлаждения.

Измерение газосодержания на выходе из холодильника позволяет оператору смещать за пределы холодильника точку достижения температуры насыщения, при которой происходит вскипание охлаждающей жидкости, тем самым повышая качество теплосъёма и охлаждение печи. Если точка вскипания жидкости расположена внутри зоны съема тепла с холодильника, то образующаяся газожидкостная смесь снижает эффективность его работы ввиду снижения таких параметров, как разница температур между теплоносителем и температурой холодильника, теплоемкость хладагента и площадь контакта хладагента.

Контролировать положение точки вскипания без непосредственного контроля газосодержания на выходе из холодильника практически невозможно по причине изменения параметра гидродинамической температурной депрессии в процессе эксплуатации контура охлаждения.

При изменении скорости потока охлаждающей жидкости в трубопроводе, а также при увеличении слоя накипи внутри контуров охлаждения в процессе эксплуатации изменяется коэффициент гидродинамического сопротивления (ГДС) холодильника (Рис. 3) и, как следствие, меняется и градиент давлений внутри охлаждающего трубопровода, что приводит к изменению положения точки вскипания воды. Расчет для графика был произведен с использованием уравнения Дарси-Вейсбаха, формулы Шифринсона, с допущением коэффициента эквивалентной шероховатости $25*10^{-2}$ мм (характерен для новых чугунных труб) и учетом ежегодного прироста абсолютной шероховатости $20*10^{-2}$ мм/год.

Из графика следует, что в процессе эксплуатации градиент давления в трубопроводе, а, соответственно и точка закипания воды, смещается, что может привести к снижению эффективности контура охлаждения. Для более наглядного представления на Рис. 4 показана зависимость потери давления на различных длинах трубопроводов при изменении коэффициента гидродинамического сопротивления.

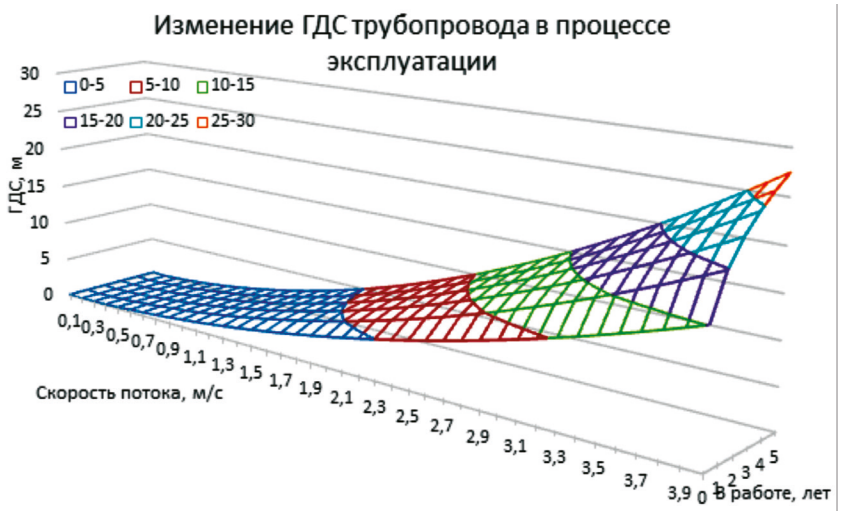


Рис. 3. Изменение ГДС трубопровода в процессе эксплуатации

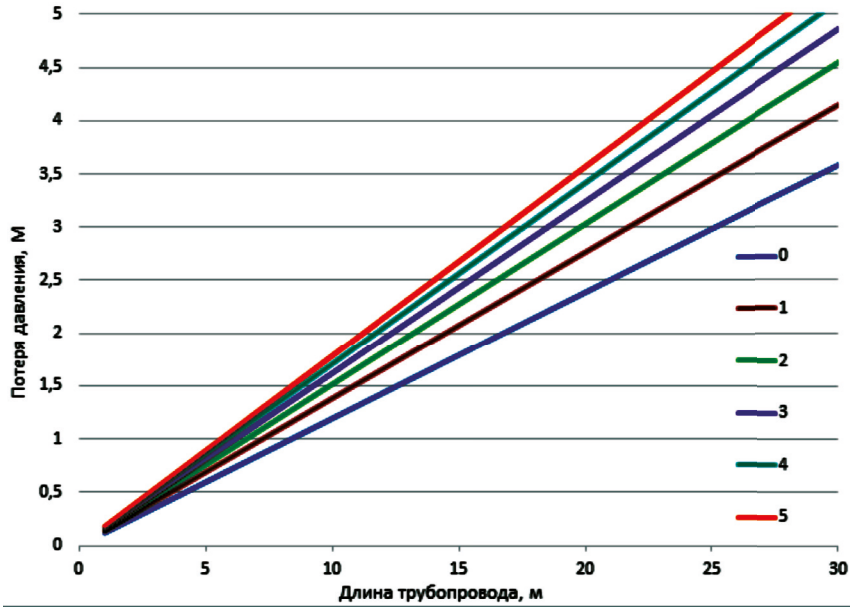


Рис. 4. Зависимость потери давления на различных длинах трубопроводов при изменении коэффициента гидродинамического сопротивления

Также стоит отметить что при применении не химочищенной воды в данных системах значение изменения гидродинамической депрессии достигает гораздо больших величин за короткие промежутки времени. Данные по изменению гидродинамической депрессии также позволят получить лучший инструмент для диагностики.

На данном графике линии 0–5 рассчитаны по годам использования чугунного трубопровода с учетом ежегодного прироста абсолютной шероховатости 0,2 мм/год.

Из полученных данных видно, что в процессе эксплуатации падение давления в трубопроводе достигает определенных значений на более коротком участке трубопровода. Из этого следует, что точка достижения водой температуры кипения также смещается в направлении начала трубопровода, то есть непосредственно в зону теплообмена.

Постоянный контроль наличия газовой фазы на выходе из холодильника обеспечивает обслуживающий персонал информацией, необходимой для поддержания оптимальных параметров подачи воды

в системах с принудительной рециркуляцией хладагента, а также позволяет оценить эффективность модернизации текущей системы охлаждения и установки циркуляционных насосов.

Благодаря уникальным возможностям по измерению газосодержания в газожидкостном потоке система позволит отслеживать температурную депрессию холодильников в режиме онлайн, что является дополнительным инструментом в диагностике системы охлаждения.

Функции, которые способна реализовать система, построенная на основе гидролокационных расходомеров с измерением доли газовой фазы:

- измерение объемного расхода охлаждающей воды;
- измерение разницы температур входящего и отходящего потока;
- измерение количества тепла, отведенного каждым измеренным контуром;
- измерение истинного газосодержания в жидкости;
- детектирование прорыва по разнице расходов на входе и выходе;
- детектирование прорыва по изменению газосодержания в выходном патрубке;
- отслеживание изменения температурной депрессии в контуре охлаждения.

Преимущества Гидролокационного метода измерения:

- бесконтактное измерение;
- монтаж без остановки процесса;
- работа на любых типах трубопроводов;
- невосприимчивость к зарастанию труб;
- невосприимчивость к изменению параметров техпроцесса.

ВЫВОДЫ

Приведенный список проблем существующих систем детектирования протечек не позволяет назвать их законченным и надежным решением для диагностики контуров охлаждения доменных печей. Использование большого числа разнородных КИП, необходимых для более надежного детектирования протечек, приводит к получению набора разнородных параметров, каждый из которых не может быть достоверным индикатором неполадок, а их анализ требует дополнительных ресурсов.

Применение законченной системы, основанной на принципе гидролокации, позволяет обслуживающему персоналу не только своевременно диагностировать систему охлаждения, но также использовать ее в наиболее оптимальном режиме для достижения высокой надежности на протяжении всей кампании доменной печи.

Система, ввиду уникального метода измерения, который позволяет получать звуковой спектр с каждого датчика и использовать эти данные для отслеживания параметров плавки обеспечивает обслуживающий персонал дополнительным набором данных для отслеживания изменений в процессе работы не только контуров охлаждения, но также доменной печи в целом. Снятие звукового спектра, либо уровня звукового давления с элементов системы диагностики позволит получать данные о процессах, проходящих непосредственно в доменной печи на уровне холодильника. Обработка звуковых данных позволит не только диагностировать систему охлаждения, но также сигнализировать о критических изменениях техпроцесса, связанных с изменением звукового спектра, либо уровня звукового давления в доменной печи.

Одними из уникальных алгоритмов обработки, получаемых данных являются методы машинного обучения. Подобные методы имеют ряд значительных преимуществ по сравнению с жесткими алгоритмами. Например, применение нейронных сетей, способных к самообучению, позволяет находить автоматически и с высокой точностью зависимости в процессах с большим количеством взаимосвязанных параметров. Нейросети способны анализировать входящую информацию в режиме реального времени. Еще одним преимуществом нейронных сетей является их способность адаптироваться к изменению параметров системы. Т.е. в тех случаях, когда резко меняются параметры техпроцесса, эмпирические формулы и жесткие алгоритмы требуют вмешательства оператора (подбор новых коэффициентов, ка-

либровочных кривых и т.д.). Нейронная сеть способна собирать новые данные и самостоятельно обучаться по ним.

Нейросети хорошо зарекомендовали себя во многих применениях: алгоритмах управления; прогнозировании поведения техпроцесса; определения параметров техпроцесса, которые сложно или невозможно оперативно измерять и рассчитывать.

Подобные решения позволят металлургическим предприятиям получить дополнительный инструмент для решения целого ряда задач:

- диагностика системы охлаждения;
- коррекция алгоритма управления системой охлаждения;
- расчет множества второстепенных параметров хода техпроцесса, например, по изменениям звукового спектра определять и прогнозировать степень износа огнеупора, изменение газопроницаемости пристеночных слоев в печи и многое другое.

Б.А. Марсуверский, ООО «НПО» Санкт-Петербургская Электротехническая Компания»

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ НА ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ АСУ ПО ИНФОРМАЦИИ ОБ АКТИВНОМ ВЕСЕ ШИХТЫ

В 1999–2003 гг. на ДП3 ($V_п$ = 2000 м^3) ОАО «Северсталь» прошло испытание АСУ ходом доменной печи по информации об активном весе шихты $K_а$ [1]. Были определены технологические поля ведения процесса при различных условиях плавки, качестве сырья и кокса. Разработан технологический режим при $K_а$ = 50–60%, обеспечивающий сохранность холодильников системы охлаждения шахты благодаря сужению зоны потока материалов и созданию защитного слоя гарниссажа. В ходе испытания отключений холодильников в этом режиме плавки не было. При этом производительность печи увеличилась на 1,5–1,7%, снизился удельный расход суммарного топлива на 0,8% и уменьшилось содержание серы в чугуне с 0,016 до 0,013%, в связи со стабилизацией процессов восстановления и шлакообразования по высоте печи. Разработан технологический режим, позволяющий повысить срок службы холодильников шахты и заплечиков.

Однако после закрытия мартеновского цеха на комбинате оказались излишними мощности по производству чугуна, поэтому были вынуждены сократить удельную производительность доменных печей и увеличить количество текущих ремонтов агрегатов. В этих условиях работы доменного цеха предложение по внедрению новой АСУ оказалось преждевременным.

В наибольшей мере для эффективного внедрения АСУ по информации об активном весе шихты подходят доменные печи, работающие с высокой интенсивностью плавки [2]. В качестве примера провели оценку для доменной печи № 5 (ДП5) ОАО «НТМК».

1. МЕТОД АНАЛИЗА И ПЕРИОДЫ РАБОТЫ ДП5 ($V_п$ = 2200 м³) ОАО «НТМК»

Для анализа режимов работы печи построили известные зависимости производительности, расхода кокса и дополнительного топлива от интенсивности плавки по сожжённому коксу [3, с. 117].

Работу печи рассмотрели в двух периодах: 80 сут. (1.06–25.08.2015) и 122 сут. (1.06–17.10.2015) со стабильным расходом энергоносителей, без участия дней в которых были простои. Для этой цели разбили исследуемые периоды на группы, отличающиеся друг от друга суточным расходом кокса в количестве 50 т. Полученные результаты свели в таблицу.

Таблица. Изменение производительности П, удельного расхода кокса К, пылеугольного топлива ПУТ, природного газа ПГ и удельного суммарного расхода топлива Т в зависимости от интенсивности плавки по сожжённому коксу $J_к$ на доменной печи № 5 ОАО «НТМК» в различных периодах

$J_к$, т/м³ сутки	1,060	1,078	1,100	1,121	среднее
Долевое участие в работе, %	17,2	43,4	31,2	8,2	
Производительность П, т/сутки	**7342**	**7272**	**7192**	**7058**	**7241**
Расход кокса сухого К, кг/т чугуна	315,8	324,8	334,7	347,7	
ПУТ, кг/т чугуна	79,7	81,1	82,8	83,5	
ПГ, м³/ т чугуна	99,8	102,2	104,1	108,1	
Т = К+0,85ПУТ+0,8ПГ, кг/т чугуна	**463,3**	**475,5**	**488,4**	**505,1**	**479,9**
Расход кислорода O_2, м³/ т чугуна	121,3	122,8	125,1	125,2	

а — период 1.06–17.10.2015 г. (122 сут.)

$J_к$, т/м³ сутки	1,060	1,078	1,100	1,123	среднее
Долевое участие в работе, %	13,8	32,5	43,7	10,0	
Производительность П, т/сутки	**7232**	**7194**	**7188**	**7025**	**7180**
Расход кокса сухого К, кг/т чугуна	321,4	328,8	335,7	350,4	
ПУТ, кг/т чугуна	81,2	81,9	82,8	85,3	
ПГ, м³/ т чугуна	101,5	103,1	104,1	108,2	
Т = К+0,85ПУТ+0,8ПГ, кг/т чугуна	**471,6**	**480,4**	**489,4**	**509,5**	**486,6**
Расход кислорода O_2, м³/ т чугуна	123,9	124,2	125,4	124,8	

б — период 1.06–25.08.2015 г. (80 сут.)

Согласно ранее проведенным исследованиям [4] на типовой ДП6 (1984 г.) с огнеупорной футеровкой стен шахты, упомянутые зависимости имеют экстремальный характер (правую и левую ветви парабол) с явно выраженной максимальной производительностью и минимальным расходом кокса. Причём минимальный расход кокса соответствует минимальному значению коэффициента затраты энергии на преодоление сил трения $K_т$.

2. АНАЛИЗ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Из данных таблицы видно изменения режимов работы ДП5: снижение производительности печи и увеличение расхода суммарного топлива при увеличении интенсивности плавки по сожжённому коксу свыше 1,06 т/м³ сутки свидетельствует о переходе в затратный по расходу энергоносителей режим работы (правая ветвь парабол). Можно утверждать, что режим с $J_К$ = 1,06 т/м³ сутки (13,8–17,2% работы в обоих исследуемых периодах) является оптимальным с максимальной производительностью 7232–7342 т/сутки и минимальным расход суммарного топлива 463,3–471,6 кг/т чугуна. Причина пере-

хода в неэффективные режимы плавки заключается в том, что при оснащении шахт переменным углом наклона и плитовыми холодильниками по всей высоте печи уменьшается трение шихты по стенке, а снижение разрушаемости при восстановлении неофлюсованных окатышей и агломерата повышенной основности Качканарского ГОК уменьшает внутреннее трение между частицами шихты. В итоге существенно снижается коэффициент затраты энергии на преодоление сил трения $K_т$ и увеличивается активный вес шихты $K_а$, а столб шихтовых материалов приобретает высокую текучесть. При этом ровность схода шихтовых материалов на колошнике, фиксируемая уровнемерами, обеспечивается в широком диапазоне расходов дутья. В новых условиях необходимо снижать интенсификацию плавки дутьём. Однако технологический персонал ограничивает расход дутья лишь при появлении признаков подстоя и обрывов шихты, ухудшающих использование химической энергии газового потока и увеличивающих расход энергоносителей. В итоге от оптимального режима снижение производительности ДП5 составляет 62–121 т/сутки (0,9–1,7%), а перерасход топлива — 17–20 кг/т чугуна (3,5–4,2%). Внедрение АСУ по информации об активном весе шихты позволит управлением «сверху» и «снизу», согласно новой технологической инструкции, вести доменный процесс в коридоре $K_а$ = 0,5–0,6, обеспечивающим работу доменной печи в оптимальном режиме. Полученные результаты анализа по производительности печи хорошо согласуются с данными промышленных испытаний на ДП3 ОАО «Северсталь». Что касается получения более высокой экономии суммарного топлива, то это связано с использованием на ДП5 ОАО «НТМК» более совершенной технологии плавки с совместным использованием высоких расходов пылеугольного топлива и природного газа.

3. ВЫВОДЫ

3.1. Внедрение АСУ по информации об активном весе шихты позволит вести доменный процесс в узком диапазоне интенсивности плавки с $K_а$ = 0,5–0,6, что позволит уменьшить расход суммарного топлива на 3,5–4,2% и увеличить производительность печи на 0,9–1,7%.

3.2. Причиной работы ДП5 в неэффективных режимах является отсутствие средств контроля предельной форсировки плавки дутьём в условиях низких значений внешнего по стенке и внутреннего трений шихты, благодаря внедрённым новым техническим решениям (переменный угол наклона шахты, металлические холодильники по всей высоте шахты) и обеспечения высокого качества сырья и кокса.

3.3. Ограничителем увеличения расхода дутья может служить величина активного веса шихты $K_а$ = 0,5, при которой силы обеспечивающие опускание шихты (вес загруженных материалов) становятся равными противодействующим силам (силы трения шихты о стенки и перепад давления газа). Снижение $K_а$ ниже 0,5 ведёт к появлению вначале мелких подстоев и обрывов шихты, перерастающих в более крупные срывающие гарниссаж и разрушающие холодильники нижней части шахты и заплечиков.

Список литературы

1. Марсуверский Б.А. Внедрение АСУ доменной печью по информации об активном весе шихты / Бюл. «Чёрная металлургия». 2016. № 1. С. 37–45.
2. Марсуверский Б.А. Совершенствование технологии производства и плавки титаномагнетитов Качканарского ГОКа в доменных печах. М.: МИСиС. Издательский дом. 2013. 395 с.
3. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. М.: Металлургия.1980. 303 с.
4. Удовенко В.Г., Марсуверский Б.А., Новиков В.С. Исследование доменного процесса при выплавке передельного чугуна // Сталь. 1985. № 8. 5–12.

Н.Г. Иванча, И.Г. Муравьева, А.С. Нестеров, Ю.С. Семенов, Е.И. Шумельчик, ИЧМ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ, РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКОЙ

Использование имеющихся резервов повышения эффективности и улучшения технико-экономических показателей процесса выплавки чугуна предполагает непрерывное совершенствование технологии доменной плавки за счет разработки и реализации новых способов и приемов контроля и управления доменной плавкой, выбора рациональных технологических режимов и режимов работы оборудования, а также повышения интеллектуального потенциала и совершенствования алгоритмов функционирования автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП). В течение последних лет отделом технологического оборудования и систем управления доменного производства (ОТОСУ) совместно с отделом металлургии чугуна (ОМЧ) Института черной металлургии (ИЧМ) им. З.И. Некрасова Национальной академии наук (НАН) Украины выполнен ряд теоретических и прикладных научно-исследовательских работ (НИР) и перспективных разработок в области доменного производства с опытно-промышленным опробованием и внедрением полученных результатов на предприятиях металлургической промышленности.

Одним из традиционных направлений работы является разработка технологических заданий (ТЗ) на проектирование систем загрузки при строительстве и реконструкции доменных печей, а также технологических требований к системам управления загрузкой с учетом сырьевых условий и особенностей технологии плавки. Разрабатываемые ТЗ включают предложения по структурной схеме системы шихтоподачи, рекомендации по выбору оборудования системы загрузки, включая загрузочное устройство, рациональные параметры оборудования и режимы его работы, обеспечивающие реализацию высокоэффективных

экономичных режимов загрузки доменных печи (рис. 1). При разработке ТЗ учитываются современные технологические требования к процессу загрузки доменных печей, включая обусловленные многокомпонентностью шихты, необходимостью загрузки некондиционных фракций шихтовых материалов, гарнисажеобразующих и промывочных материалов и смесей. ИЧМ разработано ТЗ на проектирование системы загрузки доменной печи (ДП) № 3 ЧАО «Енакиевский металлургический завод (ЕМЗ)» с установкой загрузочного устройства фирмы «P. WURTH» — объекта который в настоящее время по технико-экономическим показателям является одним из лучших в Украине. Следует отметить, что задувка и раздувка ДП № 3 также осуществлялись с технологическим сопровождением ИЧМ, которое включало расчет задувочной шихты и разработку программы ее загрузки, контроль загрузки задувочной шихты, проведение предпусковых исследований, технологическую наладку оборудования системы загрузки для обеспечения реализации заданных режимов ее работы, корректировку шлакового и дутьевого режимов, а также режима загрузки в период раздувки.

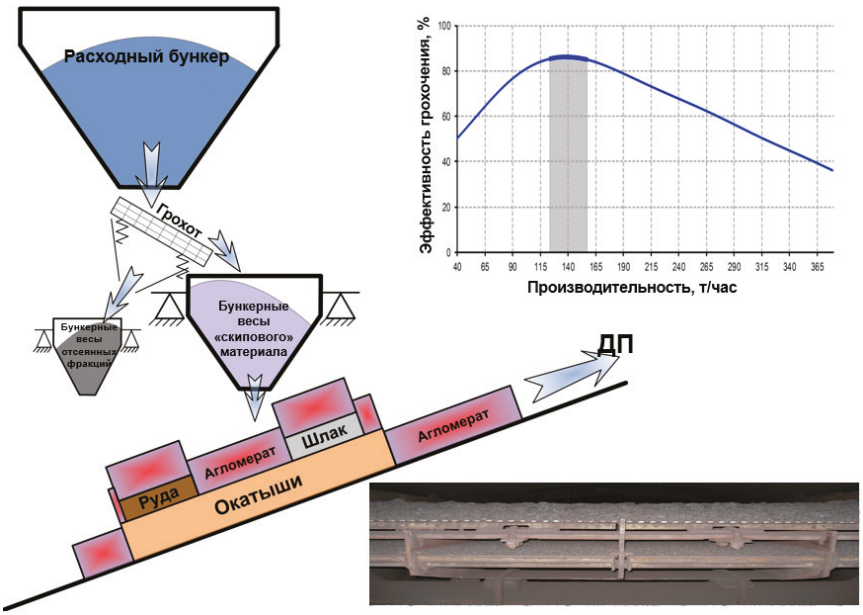


Рис. 1. Структурные схемы систем шихтоподачи и выбор рациональных режимов работы оборудования

В процессе предпусковых исследований оборудования систем загрузки и распределения шихты в промышленных условиях определяются рабочие характеристики оборудования, фактические параметры движения шихтовых материалов по тракту загрузки, характеристики формирования профиля и распределения компонентов шихты на поверхности засыпи. Исследования характеристик распределения задувочной шихты проводятся непосредственно на поверхности засыпи с установкой пробоотборников и измерительных приспособлений, а также бесконтактными методами при помощи лазерных инструментов (рис. 2). На основании полученных результатов осуществляется выбор рациональных режимов работы оборудования, корректируются настройки используемых математических моделей, разрабатываются рациональные программы загрузки доменных печей в задувочный и раздувочный период, проводится технологическая настройка работы оборудования, в том числе, настройка шихтовых затворов, выбор и формирование матрицы рациональных углов наклона лотка БЗУ с привязкой к фактическому уровню засыпи, определение рациональных параметров грохочения шихтовых материалов с обеспечением высокой эффективности, корректировка циклограммы работы оборудования системы загрузки.

Одной из наиболее актуальных проблем, с которой сталкиваются технологи-доменщики в последнее время, является многокомпонентность шихты, вызванная, в основном, истощением природных минеральных ресурсов и, связанным с этим, ухудшением качества сырья и топлива. Помимо различных

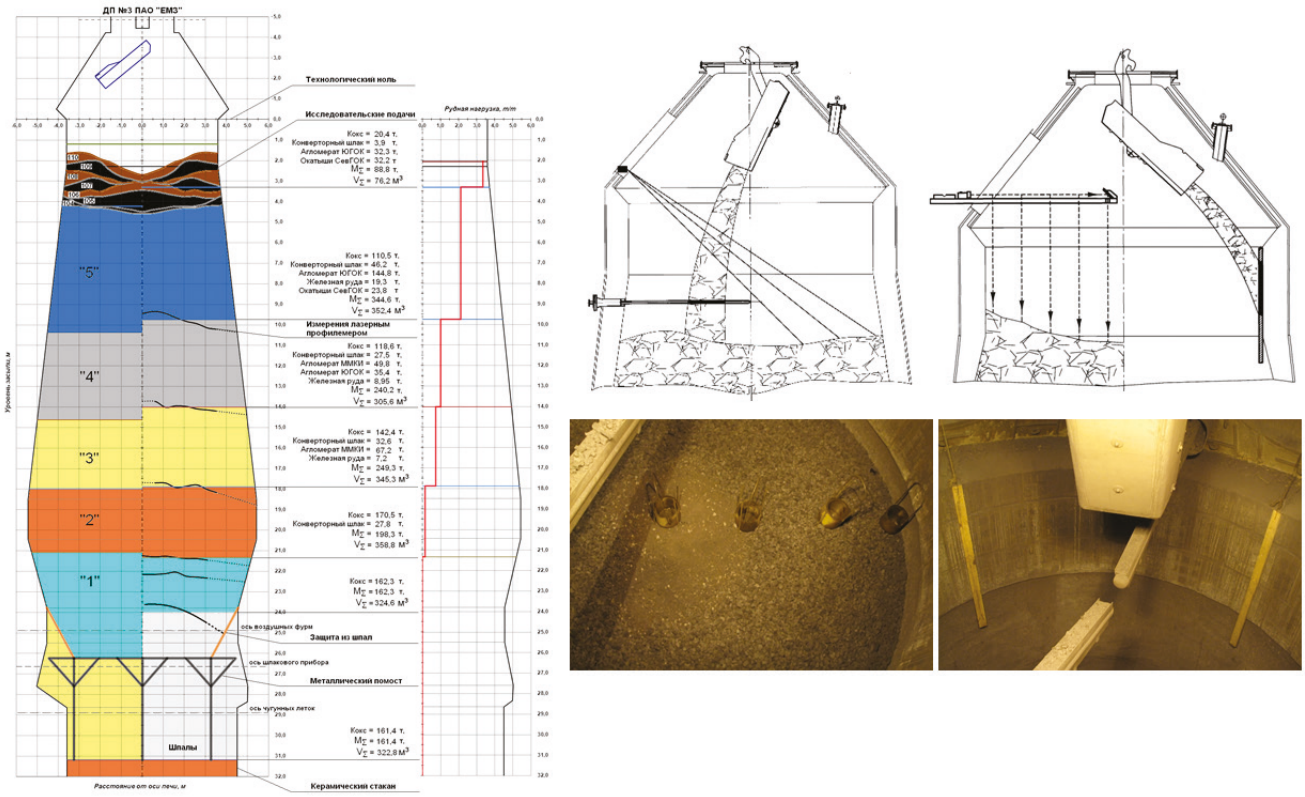


Рис. 2. Расчет задувочной шихты. Предпусковые исследования оборудования системы загрузки и распределения шихтовых материалов на колошнике

топливных, железосодержащих, флюсующих, гарнисажеобразующих и промывочных добавок, в состав шихты доменных печей Украины и России могут входить по два и более вида кокса и железорудных материалов. Эта проблема, очевидно, будет сопровождать работу технологов и в обозримом будущем. Нивелирование негативных последствий проблемы многокомпонентности шихты для доменной плавки может быть достигнуто при наличии средств и методов контроля распределения всех компонентов (кокса, агломерата, окатышей и добавок), а также технологических приемов и способов их загрузки с учетом свойств и особенностей поведения в процессе доменной плавки. В настоящее время инструментальных средств, обеспечивающих контроль и определение характеристик распределения каждого из компонентов шихты на колошнике, не существует. В связи с этим, для решения указанной задачи ИЧМ разработана комплексная математическая модель формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи. Модель обеспечивает определение текущего компонентного состава потока, формирующегося при выгрузке многокомпонентных порций из бункера БЗУ, и полного состава смесей компонентов шихты в различных кольцевых зонах колошника. Математическое и алгоритмическое обеспечение модели разработано на основе установленных фундаментальных зависимостей истечения шихтовых материалов из бункеров, а также результатов многочисленных экспериментальных исследований, выполненных ИЧМ на объектах доменного производства в промышленных условиях. Модель предназначена для применения на доменных печах с БЗУ (модель для печей с конусными загрузочными устройствами находится в стадии разработки), оснащенных скиповыми и конвейерными системами шихтоподачи (рис. 3).

В модели учтено влияние комплекса процессов перемещения массивов шихтовых материалов и смешивания компонентов в процессе движения многокомпонентных порций шихты, начиная со стадии выгрузки их на доменный конвейер или загрузки в скипы до выгрузки в колошниковом пространстве, на формирование характеристик распределения компонентов шихты на поверхности засыпи. Расчетный состав смеси компонентов шихты в заданной зоне колошника является исходной информацией

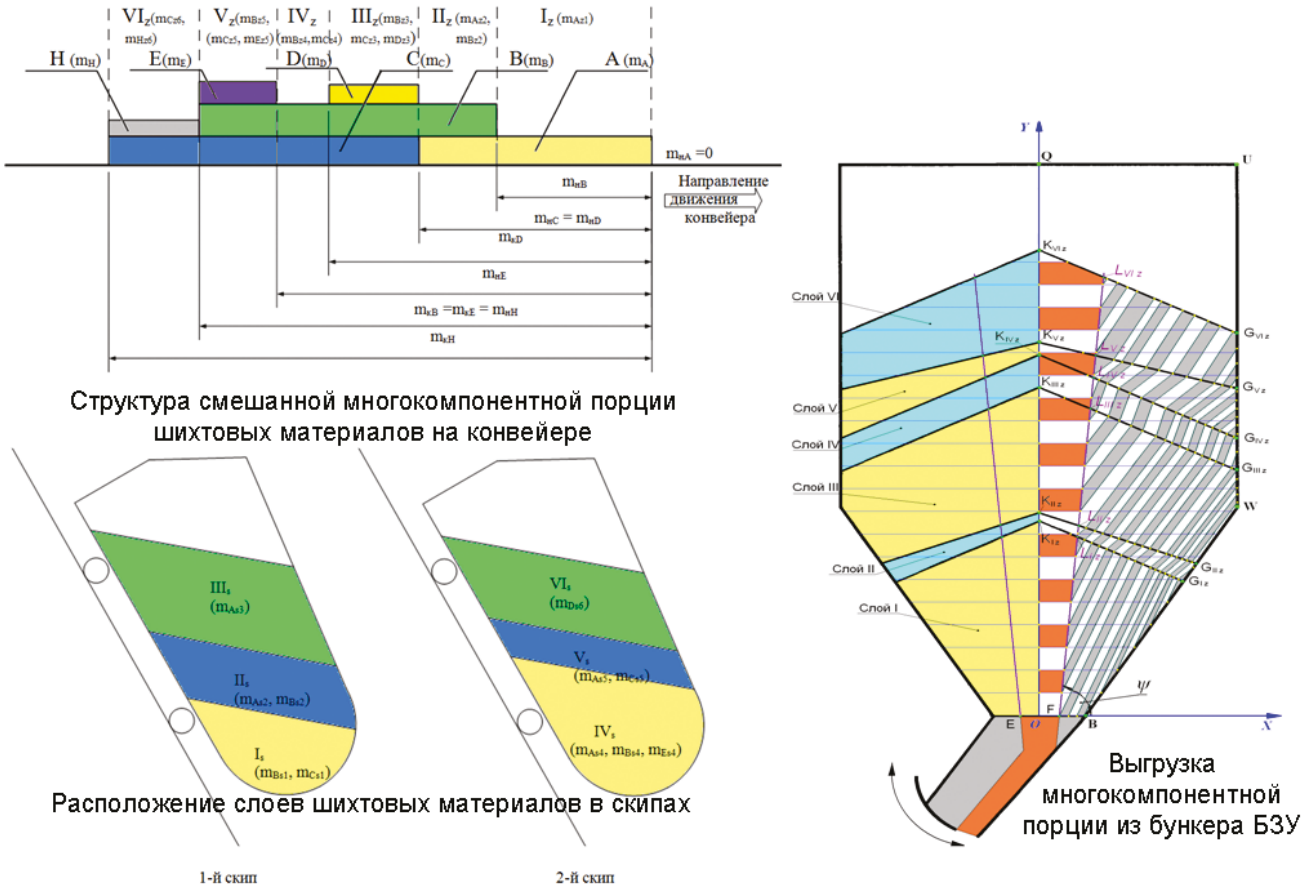


Рис. 3. Расчетная схема формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ и выгрузки из бункера

для получения прогнозной оценки свойств образующихся расплавов (содержание FeO, вязкость и др.). Сопоставление прогнозных свойств расплавов с характеристиками, заданными технологическими требованиями, позволяет выполнить оценку эффективности применяемых режимов загрузки и шлакового режима и обоснованно принимать оперативные управляющие решения по корректировке их параметров. На рис. 4 и рис. 5 приведены результаты расчетов, выполненных при помощи комплексной математической модели, которые показывают влияние параметров формирования смешанных железорудных порций на распределение основных железорудных компонентов шихты и добавок различного назначения.

Фрагмент интерфейса комплексной математической модели формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи показан на рис. 6.

На основании обобщения результатов математического моделирования с использованием комплексной модели формирования порций шихтовых материалов, их загрузки в доменную печь и распределения на колошнике, определения высокотемпературных свойств шихтовых материалов и их смесей, расчетной и экспериментальной оценки свойств образующихся расплавов и технологических требований к их распределению по сечению доменной печи, результатов экспериментальных исследований и промышленных испытаний разработаны теоретические и практические положения технологии загрузки доменных печей, оснащенных БЗУ, многокомпонентными смешанными порциями шихтовых материалов.

На рис. 7 представлена блок-схема разработанной технологии загрузки доменных печей, оснащенных БЗУ, многокомпонентными смешанными порциями шихтовых материалов, основными составля-

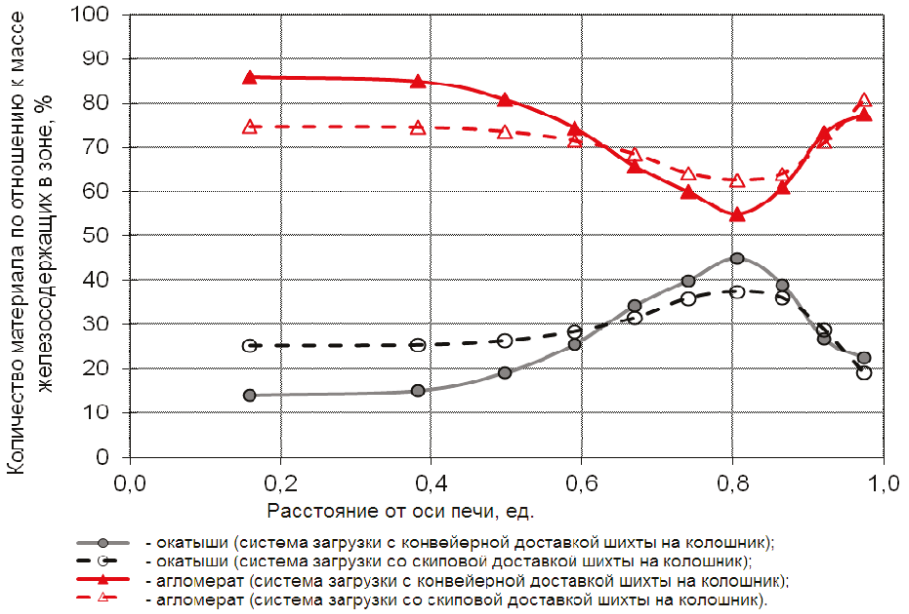
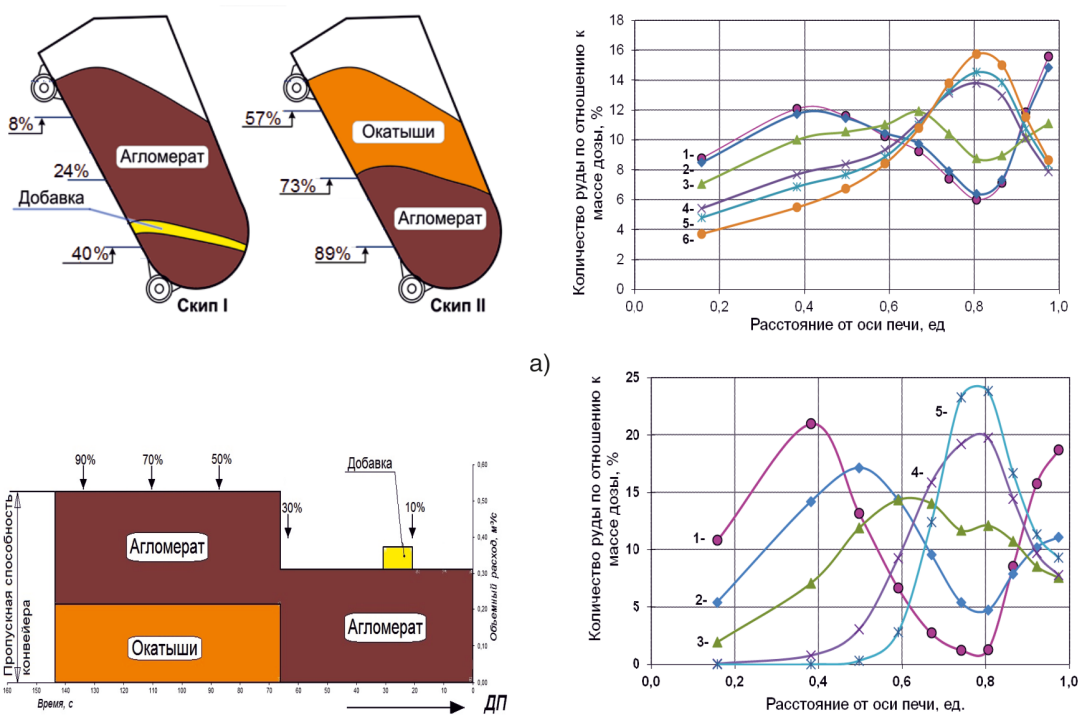


Рис. 4. Распределение агломерата и окатышей по радиусу колошника



а — система шихтоподачи со скиповой доставкой шихты на колошник; 1–6 — индекс расположения дозы добавок в скипах железорудной порции подачи вида PP↓KK↓ (шаг изменения расположения дозы добавок 16–17% от массы порции); б — система шихтоподачи с конвейерной доставкой шихты на колошник; 1–5 — индекс расположения дозы добавок в скипах железорудной порции подачи вида PP↓KK↓ (шаг изменения расположения дозы добавок 20% от массы порции).

Рис. 5. Влияние расположения дозы добавок в объеме порции на их распределение по радиусу колошника

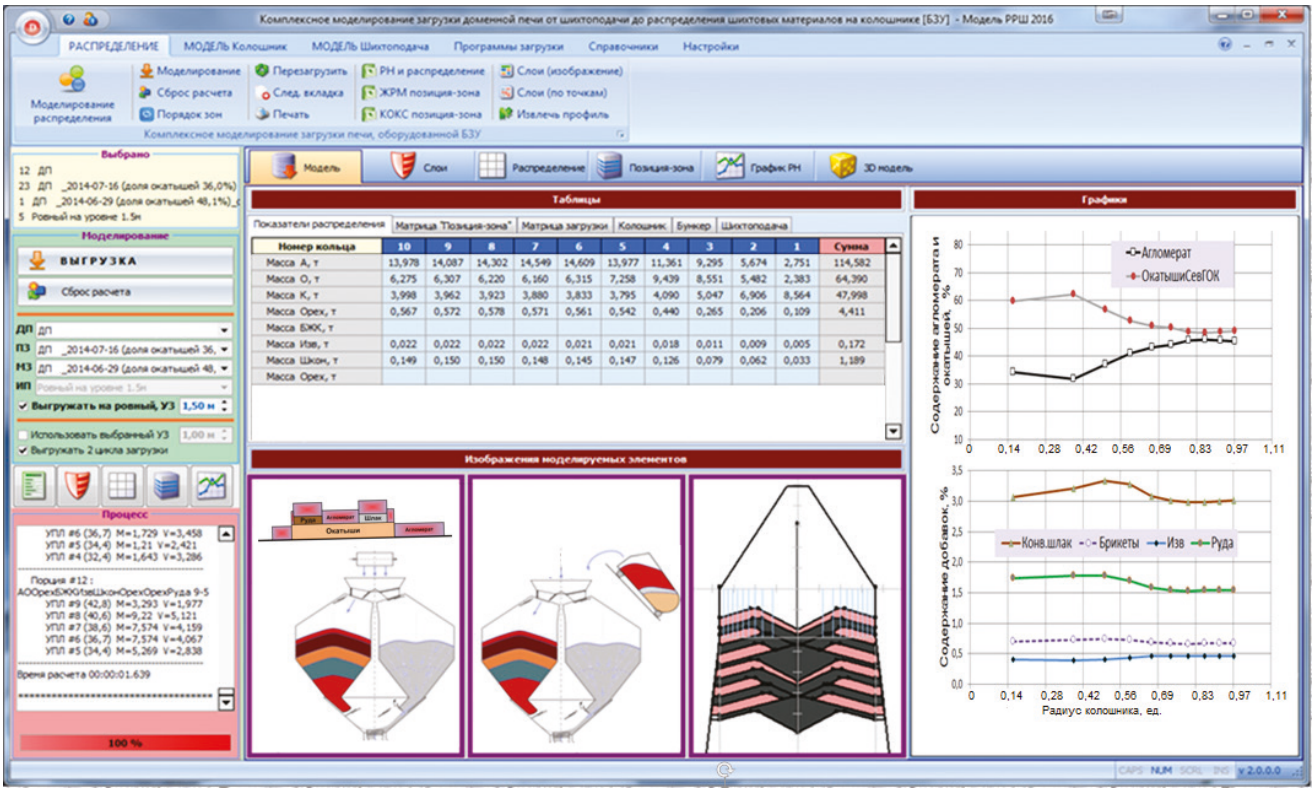


Рис. 6. Фрагмент интерфейса комплексной математической модели формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи

Рис. 7. Блок-схема технологии загрузки доменных печей, оснащенных бесконусными загрузочными устройствами, многокомпонентными смешанными порциями шихтовых материалов

ющими которой являются научно обоснованные и реализующие технологические требования приемы формирования и загрузки различных видов порций:

- железорудных смешанных порций;
- коксовых смешанных порций при использовании различных видов кокса в шихте;
- смешанных порций, содержащих добавки различного назначения;
- многокомпонентных смешанных порций, состоящих из железорудных материалов и кокса.

Положения технологии, касающиеся формирования и загрузки железорудных смешанных порций, включают рациональные структуры этих порций и метод расчетного определения параметров их формирования, в том числе, массы головной части из агломерата, обеспечивающей минимизацию содержания окатышей в пристеночной зоне, что способствует уменьшению агрессивного воздействия первичных шлаковых расплавов на огнеупорную футеровку шахты, а также препятствует износу холодильников и прогару воздушных фурм.

Для загрузки доменных печей при использовании в шихте двух и более видов кокса разработаны технологические приемы и параметры формирования коксовых смешанных порций, обеспечивающие стабилизацию процесса плавки при одновременном использовании кокса различного качества (в том числе, пекового кокса) за счет рационального распределения различных видов кокса по радиусу колошника.

В части формирования и загрузки смешанных порций, включающих добавки различного назначения, технология предусматривает выбор характера распределения конкретного вида добавок в соответствии с разработанными технологическими требованиями, использование полученных зависимостей для расчетной оценки распределения добавок в текущих условиях и выбор рациональных параметров формирования смешанных порций, в состав которых включен данный вид добавок, с определением величины управляющего воздействия, влияющего на характер распределения.

Разработанная технология содержит рекомендации по выбору структуры многокомпонентных смешанных порций, состоящих из агломерата, окатышей и кокса, рациональных диапазонов параметров формирования порций этого вида и периодичности их загрузки в составе цикла, обеспечивающие стабильное использование преимуществ смешивания железорудных материалов с коксом перед загрузкой в доменную печь, проявляющихся в уменьшении удельного расхода кокса и возможности использования увеличенного количества шихтовых материалов пониженного качества без существенного ухудшения показателей плавки. Основные положения разработанной технологии использовались при разработке режимов загрузки доменных печей ряда металлургических предприятий Украины и России.

Для технологов доменных цехов разработана модельная система выбора и корректировки программ загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, которая представляет собой упрощенную версию комплексной модели, но при этом является достаточно эффективным инструментом, обеспечивающим возможность оперативной корректировки параметров режима загрузки. При помощи модельной системы осуществляется расчет характеристик распределения масс и объемов железорудных материалов и кокса и, соответственно, рудных нагрузок, по радиусу колошника. Система успешно используется для оценки и выбора рациональных параметров режима загрузки на ДП №3 ЧАО «ЕМЗ» ООО «МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ». Фрагмент интерфейса модельной системы выбора и корректировки программ загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, показан на рис. 8.

Сотрудники ИЧМ имеют обширный опыт разработки рациональных режимов загрузки доменной печи в различных технологических условиях работы, в том числе, при вдувании пылеугольного топлива с применением различных средств контроля распределения газового потока, в частности, с использованием информации об изменении температур газового потока над поверхностью засыпи.

Опыт ввода пылеугольного топлива на ДП №3 ЧАО «ЕМЗ» показал, что в характерных для этого предприятия технологических условиях, для формирования рационального распределения газового потока по радиусу печи и достижения заданных технико-экономических показателей плавки, необходимо обеспечить реализацию следующих требований:

- предотвращение излишней «подгрузки» периферийной зоны железорудными материалами, которая может приводить к «верхним подвисаниям» и неровному сходу шихты (для сохранения достаточной газопроницаемости отношение температуры газов в пристеночной зоне к средней температуре по радиусу должно быть в диапазоне 0,85–0,95 ед.);

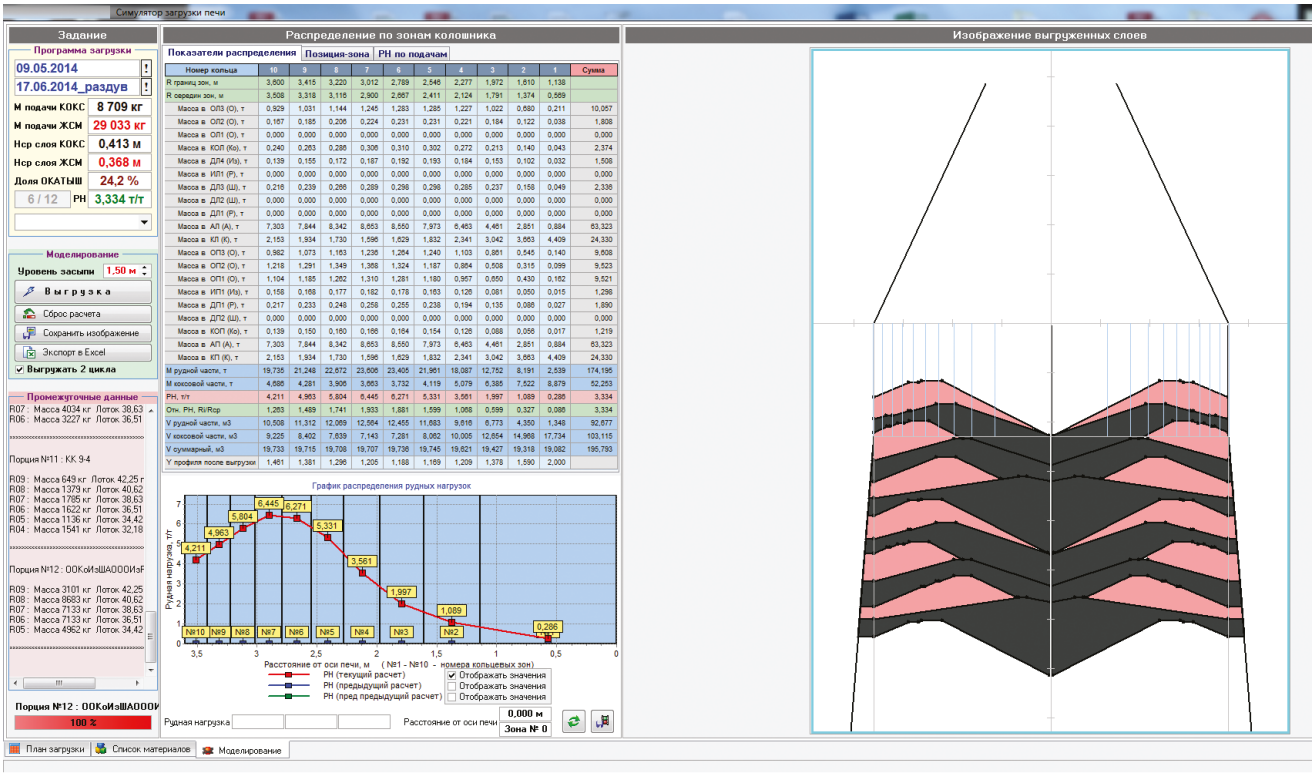


Рис. 8. Фрагмент интерфейса модельной системы выбора и корректировки программ загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ

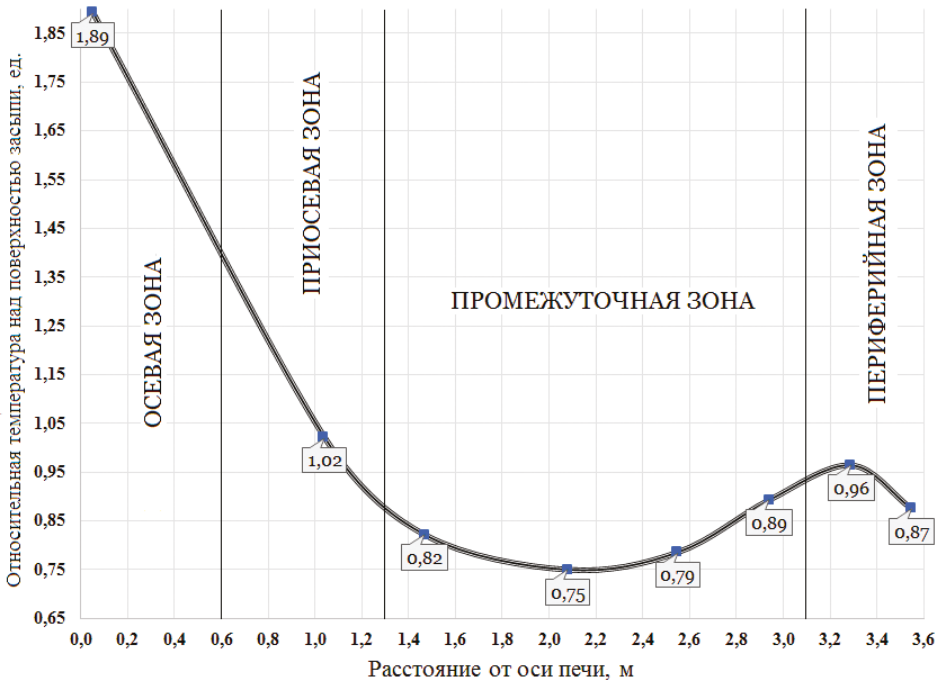
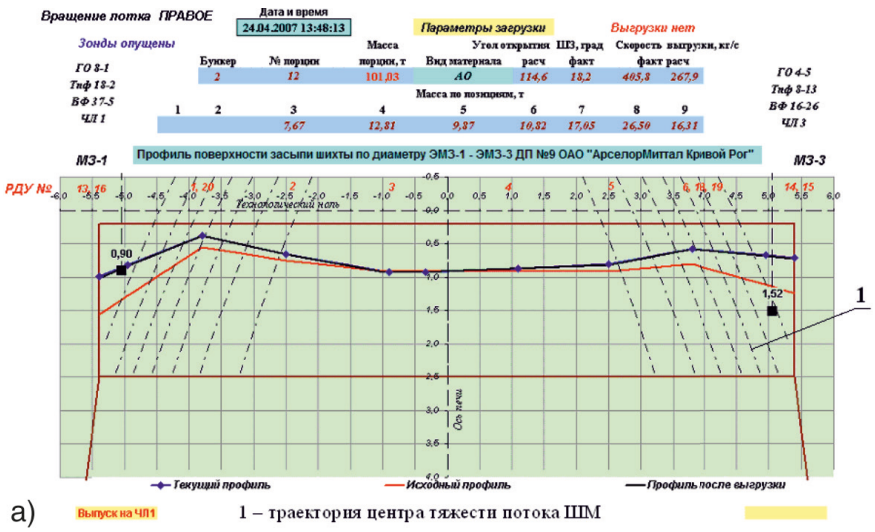
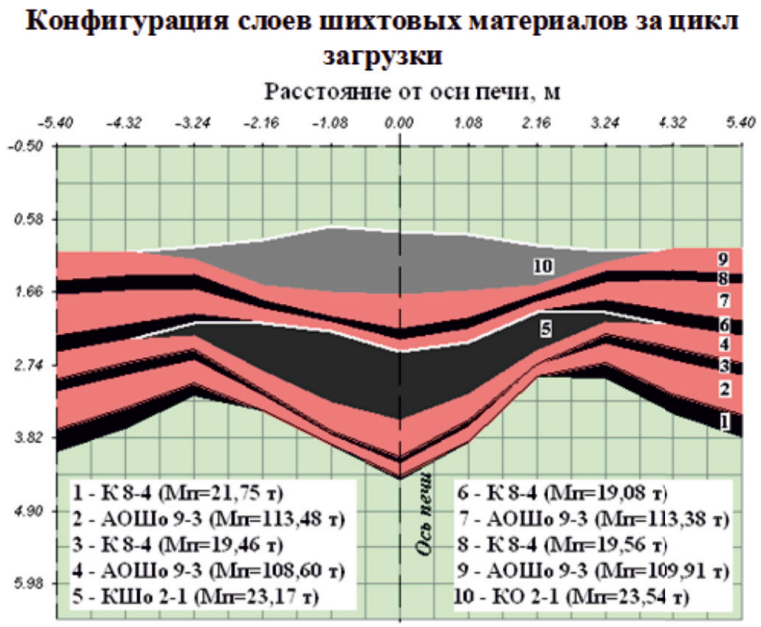


Рис. 9. Рациональное распределение газа температуры по радиусу колошника ДП №3 ЧАО «ЕМЗ» ООО «МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ»



а) 1 – траектория центра тяжести потока ШМ



б)

Рис. 10. Видеокадры выходной информации системы контроля поверхности засыпи шихты

- обеспечение развитого центрального газового потока (температура газов над поверхностью засыпи шихты в центре печи должна в 1,60–2,15 раза быть больше средней температуры) в сочетании с узкой осевой отдушиной (температура газов над поверхностью шихты на расстоянии 0,25–0,3 радиуса колошника оси печи должна быть меньше температуры непосредственно в осевой зоне, в среднем, в 1,60–2,10 раза);
- обеспечение взаимного перетока газов между периферией и центром (средняя температура газов по радиусу доменной должна быть больше в 1,15–1,35 раза температуры в промежуточной зоне).

Распределение температур газового потока над поверхностью засыпи шихты ДП № 3, соответствующее сформулированным требованиям, приведено на рис. 9.

Опыт работы на ДП №3 ЧАО «ЕМЗ» показал, что разработка и внедрение рациональных режимов загрузки шихтовых материалов даже в сложных и нестабильных шихтовых условиях обеспечивает увеличение степени использования восстановительной способности газов, и, как следствие, уменьшение удельного расхода кокса на 2,0–3,0 кг/т чугуна.

Сотрудниками отдела разработана не имеющая аналогов интеллектуальная система контроля поверхности засыпи шихты на основе информации радиолокационных измерителей, установленных на ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Информация о расстоянии до поверхности засыпи шихты используется для идентификации профиля поверхности засыпи по четырем диаметрам. Кроме этого, система обеспечивает расчет скорости опускания шихты различных сечениях печи, а также толщины образованных в результате выгрузки слоев шихтовых материалов (рис. 10).

По результатам исследований в процессе освоения системы исследования разработаны новые оригинальные методы контроля и прогноза процессов плавки:

- оценки стабильности скорости схода шихты;
- прогнозирования содержания кремния за период времени, соответствующий времени нахождения материалов в печи;
- определения формы и положения пластичной зоны в доменной печи.

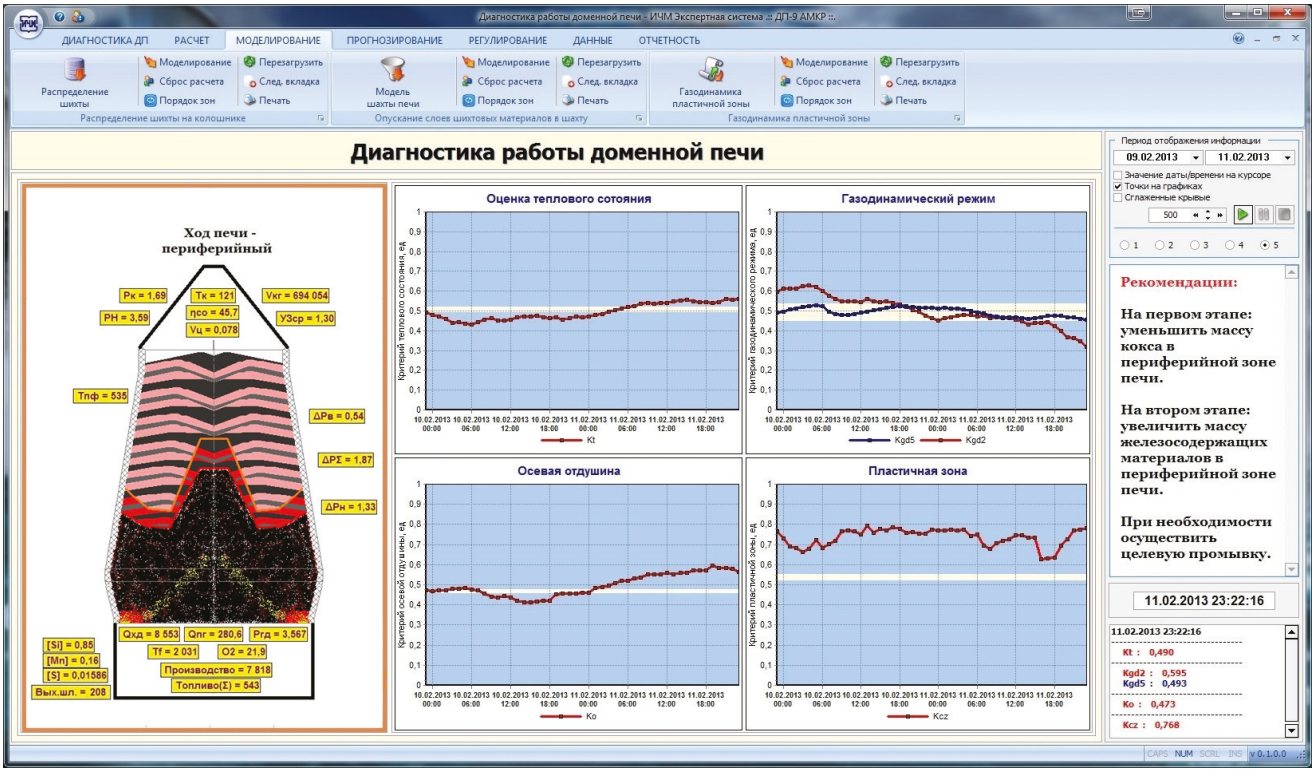


Рис. 11. Фрагмент интерфейса интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой

В настоящее время отдел завершает разработку интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой, сочетающей методы, базирующиеся на знаниях специалистов-экспертов и накопленном опыте, с предложенными методами математической оценки процессов на основе целевых критериев и алгоритмами их использования при поиске и формулировании решений по управлению процессом. В комплексных критериях объединены технологические параметры и выходные данные систем автоматизированного контроля процессов, что в значительной степени облегчит принятие операторами решений по управлению доменной плавкой. Диагностика процесса плавки осуществляется на основе расчета следующих критериев оценки: теплового состояния доменной плавки, газодинамического режима, формы и положения пластичной зоны, эффективности осевой коксовой отдушины, воздействия расплавов на футеровку металлоприемника и интегрального показателя доменной шихты. Фрагмент интерфейса интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой показан на рис. 11.

Специалисты Института активно сотрудничают с металлургическими предприятиями в части использования теоретических положений разработок, адаптации технических решений к конкретным объектам и технологического сопровождения внедрения рациональных параметров и режимов доменной плавки, режимов работы оборудования, новых средств и способов контроля технологических параметров в практику доменного производства.

А.И. Лаврухин, Л.Д. Хинский,
ОАО «ОБЛПРОМАВТОМАТИКА», г. Череповец

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ЛОТКА БЗУ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ УРОВНЯ ЗАСЫПИ ШИХТЫ НА КОЛОШНИКЕ ДП № 5 ЧЕРЕПОВЕЦКОГО МЕТКОМБИНАТА ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ»

Современные способы управления экономичным ходом доменных печей большей частью связаны с использованием бесконусных загрузочных устройств (БЗУ), позволяющих осуществлять рациональное распределение шихты по всей площади колошниковой зоны. Для оптимального радиального и окружного распределения шихтовых материалов БЗУ необходима наиболее полная информация о распределении температуры по всей поверхности уровня засыпи шихты. Такая информация позволяет осуществлять не только текущее управление ходом печи, но и является основой при построении экспертных систем управления доменными печами.

Основными метрологическими приборами, используемыми для определения температуры поверхности засыпи шихты на доменных печах, являются термопары. В основном, они расположены по окружной периферии колошника, на радиальных термобалках и в газоходах печи. Главным преимуществом термопар является их надежность и невысокая стоимость. Но наряду с такими достоинствами их использование имеет и ряд существенных недостатков.

В случае установки термопар по периферии измеряется лишь небольшой участок засыпи, а практически вся центральная зона остается вне поля измерений, что приводит к крайне малой эффективной площади измерений. Применение стационарной термобалки позволя-

ет получить приближение к температуре центральной зоны колошника. Однако ввиду того, что термобалка не лежит на шихте, а находится на расстоянии, фактически измеряется температура газового потока у поверхности, нежели температура шихты. Конструктивной особенностью термобалки является стационарное положение, что значительно сужает область исследования температуры в пределах одной выбранной при установке хорды колошника.

Термопары в газоходах оценивают только температуру отходящих газов, а значит, дают лишь косвенное представление о фактической температуре шихтовых материалов на поверхности засыпи.

Избежать данных недостатков позволяют измерительные комплексы на базе тепловизионных модулей. Современные тепловизионные устройства имеют широкий диапазон измеряемых температур и высокую точность измерений. Кроме того производимые промышленностью микроболометры позволяют измерять все поле температур с периодичностью от 3 до 9 раз в секунду, что позволяет использовать полученные значения для дальнейшего статистического анализа работы доменной печи.

Ограниченное применение таких устройств связано с обеспечением их надежности при работе в условиях чрезвычайной запыленности, воздействия высоких температур и возможных аварийных ситуациях под колошником.

Для контроля состояния распределительного лотка БЗУ и температуры поверхности засыпи шихты на колошнике ДП №5 Череповецкого меткомбината ОАО «Северсталь» был выбран способ тепловизионного измерения. Основными требованиями к тепловизионному комплексу стали диапазон измеряемых температур до 1200 гр. С, погрешность измерения не более 1%, надежность комплекса с автоматическим контролем над его состоянием.

При разработке системы тепловизионного контроля СТК-ДП-ОПА специалистами ОАО «Облпромавтоматика» были решены следующие задачи:

- Выбор защитного жаропрочного окна для измерительного модуля с метрологической корректировкой измеряемых значений.
- Разработка специализированных аэродинамических насадок для обеспечения защиты измерительного модуля от осаждения пыли на защитном окне.
- Разработка системы двухконтурного охлаждения измерительного модуля (вода, азот).
- Разработка автоматизированного гидравлического лифта для ввода-вывода измерительного модуля в доменную печь.
- Автоматическая программная корректировка координат точек измеряемых температур на поверхности шихты в зависимости от угла наклона устанавливаемых тепловизионных модулей к оси печи из-за несовпадения оптического центра камеры с физическим центром печи.
- Выявление и автоматическая коррекция «битых» пикселей микроболометра.
- Разработка АСУ СТК-ДП-ОПА с системой визуализации для дистанционного и автоматического управления тепловизионным комплексом.
- Отобразить цветовое градиентное поле распределения температур поверхности засыпи шихты, тепловизионное видеоизображение процессов внутри доменной печи, видеоизображение работы распределительного лотка БЗУ, 2D и 3D графики температур по сечению печи, состояние работы системы обдува и охлаждения тепловизионного комплекса, состояние гидравлической станции и гидролифта ввода-вывода устройства в печь.

В состав тепловизионного комплекса СТК-ДП-ОПА вошли:

Система контроля состояния лотка БЗУ:

- тепловизионный мини-комплекс
- устройство ввода-вывода тепловизионного комплекса в печь
- устройство сбора, обработки и передачи видеосигнала
- система охлаждения и обдува
- программное обеспечение.

Система контроля уровня засыпи шихты:

- тепловизионный комплекс
- гидравлический лифт ввода-вывода тепловизора в печь
- контроллер управления автоматикой

- набор аппаратно-технических средств охлаждения и защиты объектива тепловизора
- программное обеспечение

Общий вид тепловизионного комплекса представлен на рис. 1. измерительный модуль доставляется в доменную печь при помощи гидравлического лифта состоящего из двух телескопических цилиндров и имеет контуры охлаждения водой и азотом. Система защищена от проникновения доменных газов трехуровневым сальниковым затвором. Система имеет ревизионный клапан для очистки защитного окна тепловизионного модуля. Практика эксплуатации системы показала надежность аэрационных насадок сохраняющих чистоту защитного окна на протяжении более 9-ти месяцев.

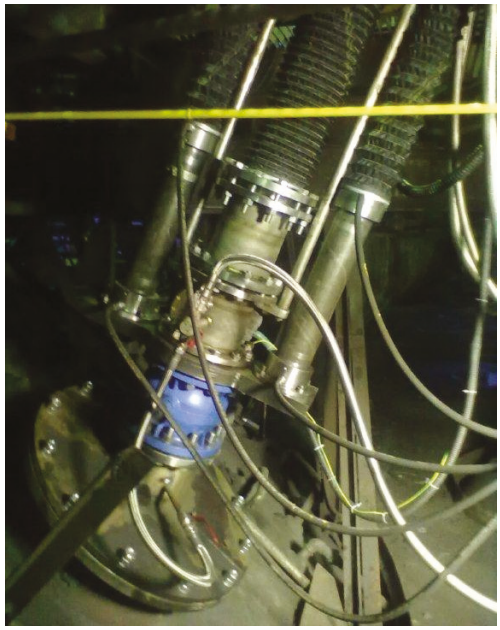


Рис. 1. Общий вид системы СТК-ДП-ОПА

Разработанное устройство ввода-вывода позволяет проводить любые регламентные работы по обслуживанию системы без остановки печи.

Наблюдение за распределением поля абсолютных температур производится с места оператора доменной печи. Экранная форма с интерактивной 2D и 3D представлено на рис. 2. 3D-графика имеет возможность масштабирования и вращения.

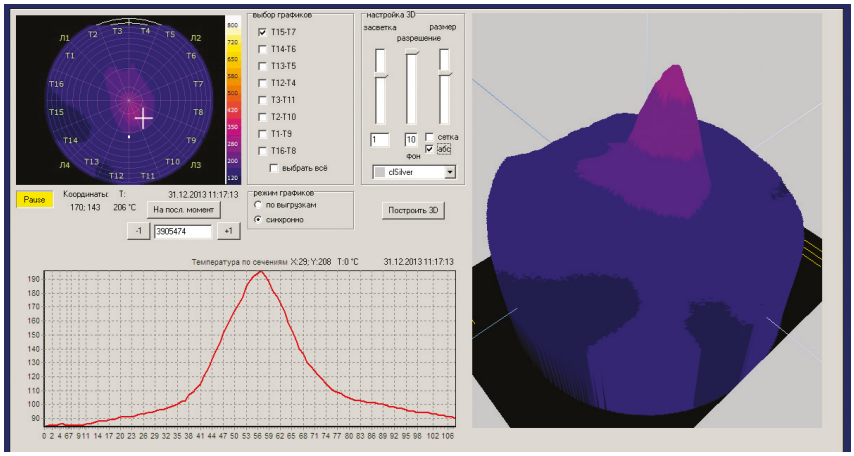


Рис. 2. Интерактивная графика

Главная экранная форма АРМ оператора представлена на рис. 3.

На этой форме отображаются место расположения измерительного модуля, состояние систем охлаждения и обдува комплекса, состояние гидравлической станции и шиберного затвора печи, а также производится дистанционное управление вводом-выводом устройства в печь. В случае аварийной ситуации измерительный модуль автоматически выводится из печи (рис. 4).

Контроль за лотком БЗУ осуществляется тепловизионным модулем с ручным вводом-выводом в печь. Изображение состояния лотка выведено на экран оператора печи (рис. 5).

В настоящий момент система тепловизионного контроля эксплуатируется на ДП-5 с декабря 2013 г. и показала свою высокую надежность и эффективность. Специалистами предприятия ОАО «Облпромавтоматика» дорабатывается дополнительный программный модуль технолога доменного производства для автоматизированного статистического анализа параметров работы доменной печи.

Разработанная система жизнеобеспечения тепловизионного модуля, уникальное математическое и программное обеспечение не имеет отечественных и зарубежных аналогов.

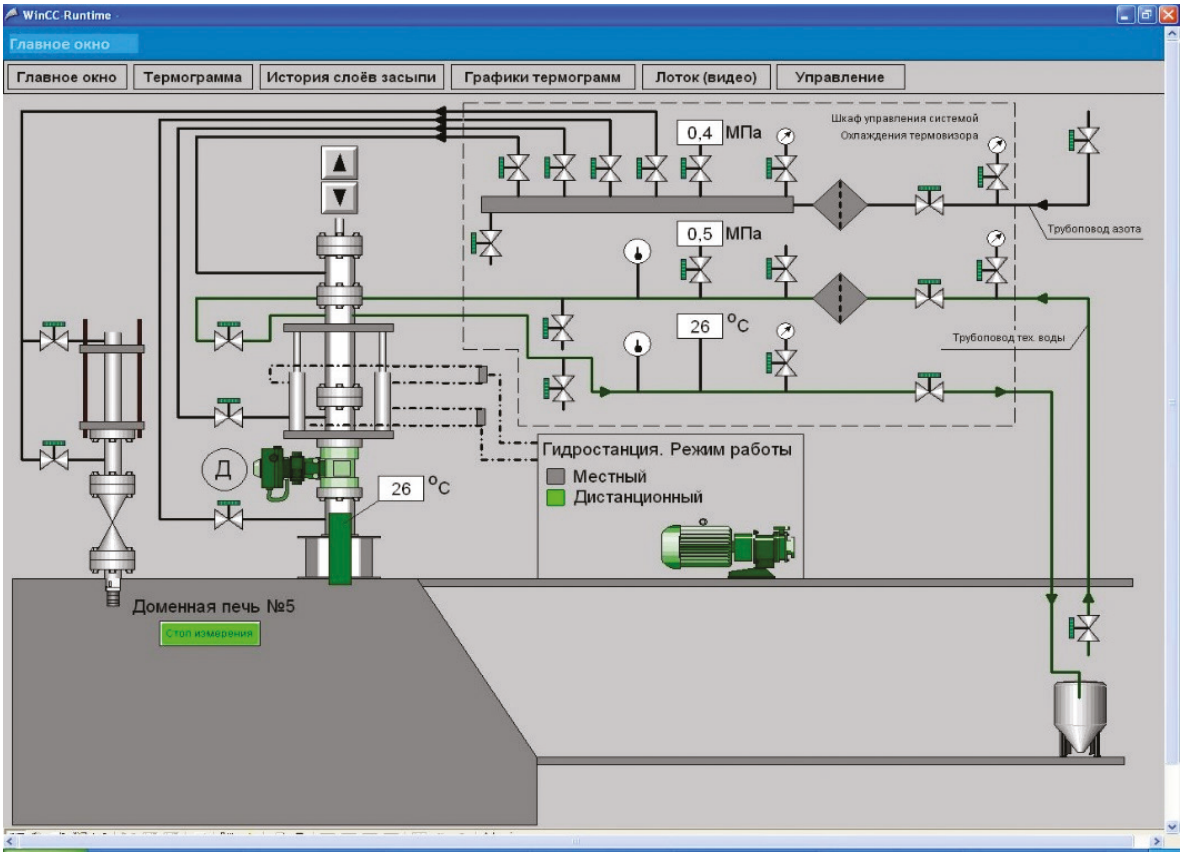


Рис. 3. Главная экранная форма АСУ СТК

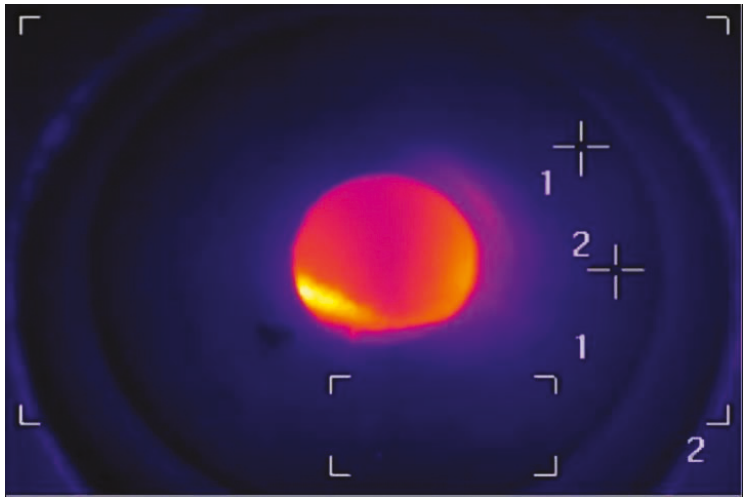


Рис. 4. Автоматический вывод тепловизора из печи

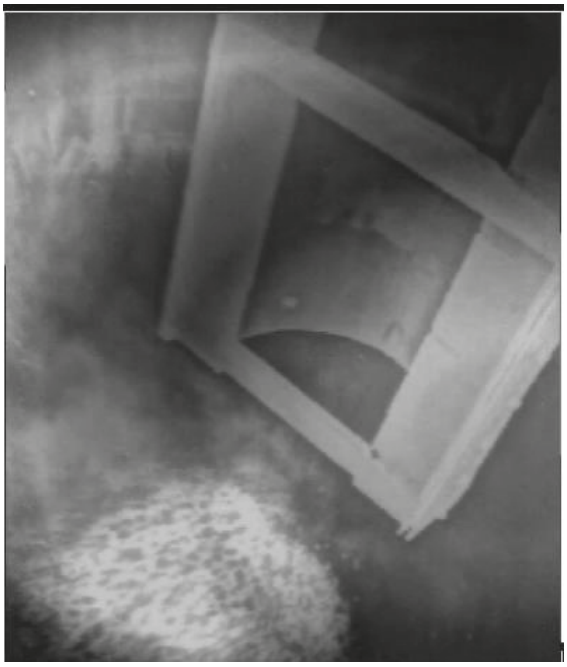


Рис. 5. Динамическое изображение состояния лотка

А.В. Липатников, Д.А. Шнайдер, А.А. Полинов, А.В. Колосов, Е.Н. Степанов, М.А. Цыгалов, А.Е. Степанова, Е.В. Астратова, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИВОЗА И ПОТРЕБЛЕНИЯ УГОЛЬНОГО И ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ В АГЛО-КОКСО-ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВАХ ОАО «ММК» НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Данная разработка ориентирована на использование руководителями металлургических предприятий, с целью более обоснованного принятия решений аналитиками технологических и бизнес-процессов металлургических предприятий, техническими специалистами. Разработка выполнена специалистами ОАО «ММК» с привлечением ученых ФГАОУ ВО ЮУрГУ (НИУ).

ВВЕДЕНИЕ

По состоянию на сентябрь 2016г. ОАО «Магнитогорский Металлургический Комбинат» (ММК) занимает 18% долю на Российском рынке стали, а также 31 место в мире по ее производству с показателем 12,2 млн т стали в год [1]. Для обеспечения данного уровня производства ММК годовой объем закупок в 2015 году составил порядка 190 млрд. рублей. При этом следует учитывать, что основное сырье составляет 57% от общего объема закупок [2].

Группа компаний ММК самостоятельно обеспечивает 39% потребности в угольном концентрате за счет фабрики ОАО «Белон», однако для обеспечения всей потребности по агло-коксо-доменному переделу необходимо закупать сырье у сторонних производителей. Поскольку предлагаемое на рынке сырье, как угольное, так и железорудное,

в значительной степени различается как по качеству, так и по ценам, а также является взаимозаменяемым, возникает задача оптимальной закупки сырья: обеспечение требуемого качества сырья при его минимальной стоимости, либо получение наилучшего качества сырья при заданном бюджете.

При этом следует учитывать, что экономический эффект можно получить не только за счет снижения стоимости ресурсов или расходных коэффициентов, но и от увеличения объемов производства чугуна, т.к. нехватку чугуна в «стальном» переделе можно компенсировать закупкой лома, стоимость которого обычно гораздо выше себестоимости производства чугуна. Следовательно, основной целью разрабатываемого комплексного подхода к оптимальной закупке ресурсов является снижение себестоимости стали.

Решение общей задачи снижения себестоимости стали достигается за счет решения локальных задач по своим переделам. Таким образом, возникают 3 задачи:

- привоза и потребления угольного сырья для эффективного производства кокса;
- привоза и потребления железорудного сырья, для эффективного производства агломерата и чугуна;
- интеграции полученных результатов в общей системе.

Опыт разработки различных локальных моделей широко освещен в трудах отечественных и зарубежных авторов. В области прогнозирования качества металлургического кокса следует отметить авторов [3–8], в области моделирования качественных характеристик агломерата — работы [9–12], в области оптимизации и автоматизации процессов металлургических процессов — работы [13–19]. Однако данные исследования являются лишь частями интегрированной системы управления.

Комплексный подход оптимального управления металлургическим производством по критерию снижения себестоимости стали, реализован в моделях, описанных далее.

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИВОЗА И ПОТРЕБЛЕНИЯ УГОЛЬНОГО СЫРЬЯ

Данная модель основана на изучении статистики коксования ОАО ММК за 2011–2016 года. На основе данной статистики были разработаны модели зависимостей влияния показателей качества угольной шихты на показатели качества кокса. Следует отметить, что особое значение при построении зависимостей имеет показатель технологической ценности угля, описанный в работе Степанова Е.Н. «Определение технологической ценности угольных концентратов для коксования» [5]. Наличие данных зависимостей позволяет применять оптимизацию не к показателям качества угольной шихты, а к показателям качества кокса, что дает большую вариативность при построении модели.

Далее приведена математическая постановка модели оптимизации привоза и потребления угольного сырья:

$$F = \sum_{i=1}^{n} c_i r_i \rightarrow min \qquad (1)$$

$$\begin{cases} M_1 \le M^*_{10} & (2) \\ M_{25} \ge M^*_{25} & (3) \\ Ad_c \le Ad^*_c & (4) \\ Sd_c \le Sd^*_c & (5) \\ Vd \le Vd^* & (6) \\ V_i^{\min} \le V_i \le V_i^{\max} & (7) \\ \sum_{i=1}^{n} f_i \le f^* & (8) \\ \sum_{i=1}^{n} r_i = 1 & (9) \\ r_i \ge 0 & (10) \end{cases}$$

c_i — цена 1-ой тонны угольного концентрата *i*-го поставщика;

r_i — общая доля i-го поставщика в структуре закупаемого сырья;

n — количество поставщиков;

M_{10}, M_{25}, Ad_c, Sd_c — основные показатели качества кокса: прочность на истирание, прочность на удар, содержание золы, содержание серы (звездой отмечается требуемый уровень качества);

V_i^{min} — минимальное контрактное ограничение по объему поставки для *i*-го поставщика;

V_i^{max} — минимальное контрактное ограничение по объему поставки для *i*-го поставщика (либо производственная мощность поставщика);

V_i — объем сырья приобретаемого у *i*-го поставщика;

f_i — доля углей жирных марок в общей структуре шихты, % (звездой отмечается требуемый уровень качества).

При разработке математической модели учитывался опыт и пожелания различных служб ОАО ММК, включающих коксохимическое производство (КХП), научно-технический центр (НТЦ), управление материально-технических и энергетических ресурсов (УМТЭР), управление экономики. Их опыт реализован в виде исходных данных, целевой функции и ограничений модели.

Целевой функцией модели является стоимость одной тонны угольной шихты, т.к. основная — задача получение экономического эффекта. Ограничения (2–5) задает НТЦ, исходя из необходимого качества получаемого кокса. Ограничения (6) и (8) задает КХП, исходя из текущего состояния печного фонда и желаемого расходного коэффициента угля на производимый кокс. Ограничение (7), а также цены для целевой функции, задает УМТЭР, исходя из сложившейся рыночной ситуации.

Так как модель используется различными службами и для различных целей, существуют различные варианты ее реализации.

1) *Калькулятор качества*. Используются только разработанные статистические уравнения для оценки показателей качества получаемого кокса, исходя из задаваемой структуры угольной шихты и показателей ее качества, полученных на входном контроле. В данном варианте учитывается только потребление угольной шихты. Оптимизация отсутствует.
2) *Калькулятор привоза и расхода угольной шихты*. Используются разработанные статистические уравнения, однако в данном варианте учитывается планируемый склад угольных концентратов на начало прогнозируемого периода, а также регламент прямого парка, принятый в данном месяце. Варьируемым параметром в данном расчете является уже не расход угольной шихты, а ее привоз. В данном калькуляторе поддерживается возможность сравнения экономического эффекта между разными вариантами. Оптимизация отсутствует.
3) *Оптимизационная модель*. Данная модель производит поиск наиболее дешевого варианта структуры угольной шихты, исходя из исходной информации и требуемого качества. По результатам оптимизации формируется комплексный отчет, содержащий оптимальный привоз угольного концентрата, обеспечивающий наилучший расход и оптимальный склад на конец прогнозируемого месяца, расчет ожидаемого экономического эффекта в сравнении с базовым вариантом, показатели качества и технико-экономические показатели, дефицитных и избыточных поставщиков концентрата, а также анализ влияния цен поставщиков на оптимальную структуру угольной шихты.
4) *Модуль оптимального движения сырья на угольном складе*. Данный модуль необходим для оперативного обеспечения оптимального привоза и расхода угольной шихты в разрезе суток. В модуль входят визуализация штабелей с указанием параметров качество угольной шихты в любой точке склада, а также рекомендации по управлению закладкой штабеля, его забором и долей прямого парка.

В качестве примера можно рассмотреть сравнение базового варианта, запланированного в бюджете с оптимальным расчетом (см. табл. 1).

Как видно из таблицы 1 структура не претерпела сильных изменений, однако позволила сократить содержание марок в ГЖ на 1,5%, КО на 2%, ОС на 3%, при этом увеличив содержание марки Ж на 2%, К на 3%, и ГЖО на 1,5%. При этом средневзвешенное содержание серы в шихте снизилось на 0,07%, а толщина пластического слоя возросла на 0,73 мм.

Таблица 1. Сравнительная таблица структуры привоза и потребления угольной шихты

Поставщики	сравнение привоза			сравнение расхода		
	Базовый вариант (бюджет)	Оптимальный расчет	отклонение	Базовый вариант (бюджет)	Оптимальный расчет	отклонение
	%	%	%	%	%	%
Поставщик 1	33%	33,3%	0,1%	31,5%	35,9%	4,3%
Поставщик 2	2%	3,2%	1,6%	1,6%	0,7%	-0,9%
Поставщик 3	12%	10,4%	-1,9%	11,7%	9,7%	-2,0%
Поставщик 4	8%	10,7%	3,0%	7,9%	10,2%	2,3%
Поставщик 5	2%	0,0%	-2,2%	2,0%	0,8%	-1,2%
Поставщик 6	1%	0,9%	-0,5%	1,3%	1,0%	-0,2%
Поставщики жирных марок	58%	59%	0%	56%	58%	2%
Поставщик 7	2,2%	2,7%	0,5%	2,2%	2,6%	0,4%
Поставщик 8	13,0%	15,3%	2,3%	14,2%	14,0%	-0,1%
Поставщик 9	2,2%	0,0%	-2,2%	2,3%	1,1%	-1,2%
Поставщик 10	4,3%	5,1%	0,8%	4,7%	4,7%	0,0%
Поставщик 11	1,5%	1,3%	-0,3%	1,7%	1,6%	-0,1%
Поставщик 12	0,8%	0,6%	-0,1%	1,0%	1,1%	0,1%
Поставщик 13	3,1%	2,5%	-0,6%	2,3%	1,6%	-0,7%
Поставщик 14	3,1%	3,8%	0,7%	3,1%	2,8%	-0,3%
Поставщик 15	8,0%	1,7%	-6,3%	8,9%	5,3%	-3,6%
Поставщик 16	1,2%	1,5%	0,3%	1,6%	1,9%	0,4%
Поставщик 17	2,2%	1,8%	-0,4%	2,1%	1,9%	-0,2%
Поставщик 18	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
Поставщик 19	0,0%	5,1%	5,1%	0,0%	3,2%	3,2%
Поставщики коксовых марок	42%	41%	0%	44%	42%	-2%
Итого	100%	100%	0%	100%	100%	0%

Таким образом, ожидаемый показатель M_{10} снизился на 0,2%, M_{25} возрос на 0,16%, а содержание серы снизилась на 0,06%. При этом данный вариант расхода угольной шихты будет стоить на 95 руб./т дешевле, что в конечном итоге позволит сэкономить на себестоимости стали, как за счет снижения цены угольной шихты, так и за счет снижения удельного расхода кокса с учетом повышению его качества.

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИВОЗА И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ

В отличие от предыдущей, данная модель основана на не на статистических зависимостях, а на балансовых соотношениях перехода материалов из сырья в агломерат. В первую очередь учитываются содержание различных химических элементов и соединений, основность и производственная программа. Планируется введение в модель показателей качества агломерата, таких как содержание фракции 5–0. К настоящему моменту изучение статистики не позволило разработать до-

стоверных уравнений по качественным показателям агломерата, и, как следствие, они участвуют в модели косвенно, например, ограничивая содержание тонких концентратов в шихте.

Далее приведена математическая постановка модели оптимизации привоза и потребления железорудного сырья:

$$F = \sum_{i=1}^{n} c_i * r_i \rightarrow min \qquad (11)$$

Ограничения в агломерационном переделе

$$\begin{cases} P_A = P_A^* & (12) \\ SB_{\min}^* \le SB \le SB_{\max}^* & (13) \\ C_{\min}^* \le C \le C_{\max}^* & (14) \\ L_{\min} \le L \le L_{\max} & (15) \\ V_i^{\min} \le V_i \le V_i^{\max} & (16) \\ \sum_{i=1}^{n} r_i = 1 & (17) \\ r_i \ge 0 & (18) \end{cases}$$

Ограничения в доменном переделе

$$\begin{cases} P_I \ge P_I^* & (19) \\ BOF_{\min}^* \le BOF \le BOF_{\max}^* & (20) \\ Fe_{\min}^* \le Fe \le Fe_{\max}^* & (21) \\ Sl_{\min} \le Sl \le Sl_{\max} & (22) \\ MgO_{\min} \le MgO \le MgO_{\max} & (23) \\ Al_2O_{3_{\min}} \le Al_2O_3 \le Al_2O_{3_{\max}} & (24) \\ V_i^{\min} \le V_i \le V_i^{\max} & (25) \\ \sum_{i=1}^{n} r_i = 1 & (26) \\ r_i \ge 0 & (27) \end{cases}$$

n — количество поставщиков железорудного сырья;

c_i — стоимость 1 т железорудного сырья *i*-ого поставщика, используемого в расходе;

r_i — доля железорудного сырья *i*-ого поставщика в структуре ЖРС;

P_A, P_I — объем производства агломерата и чугуна (звездой отмечается требуемый объем производства агломерата);

SB, *C* — основные показатели качества агломерата: основность агломерата и содержание тонких концентратов в шихте (звездой отмечается требуемый уровень качества);

L, $L_{\min}$, $L_{\max}$ — используемое, минимальное и максимальное количество известняка;

BOF, *Fe*, *Sl*, *MgO*, Al_2O_3 — основные показатели качества чугуна и шлака: основность шлака в доменном цехе, содержание железа в шихте доменного цеха, выход шлака в доменном цехе, содержание *MgO* в шлаке доменного цеха, содержание Al_2O_3 в шлаке доменного цеха (звездой отмечается требуемый уровень качества, min и max — допустимые пределы);

$V_i^{\min}$, $V_i^{\max}$ — минимальное и максимальное контрактные ограничения по объему поставки для *i*-го поставщика;

V_i — объем сырья, приобретаемого у *i*-го поставщика.

Данная модель включает в себя оптимизацию в двух переделах: агломерационном и доменном. Решение не разделять задачи было принято для достижения глобальной оптимальности по потреблению

сырья, так как в противном случае, результаты решения первой задачи являлись бы входными данными для второй, что снижало бы границы ограничений первой задачи.

Источниками исходных данных и ограничений в постановке задачи являются следующие службы ОАО ММК: горно-обогатительное производство (ГОП), доменный цех (ДЦ), НТЦ, УМТЭР и управление экономики.

Целевой функцией является стоимость одной тонны железорудного сырья, причем допускается удорожание себестоимости тонны агломерата, если это приводит к снижению себестоимости железорудного сырья в целом. Ограничения (12) и (14) задает ГОП, исходя из производственной программы и графика ремонтов. Ограничения (13, 15, 20, 21, 23 и 24) вводятся НТЦ, исходя из необходимого качества получаемого чугуна и безопасности агло-доменного процесса. УМТЭР вводит контрактные ограничения (16, 25), а ДЦ вводит ограничения (19, 22) исходя из производственной программы и графика ремонтов.

В отличие от модели по привозу угля, технология закладки штабелей и забора сырья из них занимает два месяца, поэтому задача решается в два этапа. На первом этапе оптимизируется привоз и расход сырья в доменном цехе в течение первого месяца, т.к. окатыши подаются «прямым парком», минуя склад горно-обогатительного производства. На втором этапе оптимизируются расход сырья в агломерационном и доменном производстве второго месяца, а также корректируется привоз сырья первого месяца.

Для достижения расхода железорудного сырья, полученного на основе модели, разрабатываются дополнительные модули: модель оптимизации оперативного привоза сырья и модель закладки сырья в штабель. Первая модель предполагает разработку оптимального оперативного привоза сырья для дальнейшего заключения договоров согласно срокам, разработанным в модели. Вторая модель выдает рекомендации закладки сырья в определенные штабеля для достижения максимальной ровности сырья по основности.

В качестве примера можно рассмотреть сравнение базового варианта, запланированного в бюджете, с оптимальным расчетом (см. табл. 2 и табл. 3).

Таблица 2. Сравнительная таблица структуры привоза и потребления агломерационного сырья в первом месяце

Наименование	Первый месяц					
	Приход			Расход		
	Вес, тонн					
	План	Модель	Откл	План	Модель	Откл
Концентрат						
Поставщик 1	450 000	450 000		450 944	449 370	–1 574
Поставщик 2	40 000	4 500	-35 500	65 000	65 000	
Поставщик 3	30 000	49 500	19 500	50 000	50 000	
Аглоруда						
Поставщик 4	55 000	56 000	1 000	80 000	44 588	–35 412
Поставщик 5	18 000	18 000		18 000	29 513	11 513
Поставщик 6	20 000	22 000	2 000			
Поставщик 7				5 000	5 000	
Поставщик 8	30 000	30 000		30 000	57 671	27 671
Поставщик 9	25 000	26 000	1 000			
Собственное сырье						
Известняк				110 000	105 210	–4 790
Коксик				53 040	52 920	–120

Продолжение табл. 2

Наименование	Первый месяц					
	Приход			Расход		
	Вес, тонн					
	План	Модель	Откл	План	Модель	Откл
Всего покупного сырья	683 000	671 000	–12 000	713 944	716 142	2 198
Всего покупного и собственного сырья				1 115 141	1 112 429	–2 712
Агломерат из Аглоцеха				930 225	930 225	
Окатыши						
Поставщик 10	186 000	182 000	–4 000	186 000	186 000	
Поставщик 11	250 000	238 500	–11 500	204 140	194 140	–10 000
Поставщик 12		7 800	7 800		7 473	7 473
Сумма:	454 000	446 300	–7 700	1 341 702	1 339 176	–2 527
Кокс				370 894	370 894	
Кварцит	4 000	6 527	2 527	4 000	6 527	2 527
Всего покупного сырья	441 000	433 300	–7 700	395 140	392 613	–2 527

Таблица 3. Сравнительная таблица структуры привоза и потребления агломерационного сырья во втором месяце

Наименование	Второй месяц					
	Приход			Расход		
	Вес, тонн					
	План	Модель	Откл	План	Модель	Откл
Концентрат						
Поставщик 1	450 000	450 000		375 912	365 912	–10 000
Поставщик 2	30 000	30 000		35 000		–35 000
Поставщик 3	95 000	95 000		95 000	107 427	12 427
Аглоруда						
Поставщик 4	55 000	55 000		30 000	59 903	29 903
Поставщик 5	18 000	18 000		20 000		–20 000
Поставщик 6	20 000	20 000		20 000	20 000	
Поставщик 7						
Поставщик 8	30 000	30 000		30 000	30 000	
Поставщик 9	25 000	25 000		20 000	40 000	20 000
Собственное сырье						
Известняк				110 000	109 643	–357
Коксик				51 217	51 072	–145
Всего покупного сырья	738 000	738 000		640 912	638 241	–2 671
Всего покупного и собственного сырья				1 038 216	1 035 044	–3 172
Агломерат из Аглоцеха				859 119	859 119	

Продолжение табл. 3

Наименование	Второй месяц					
	Приход			Расход		
	Вес, тонн					
	План	Модель	Откл	План	Модель	Откл
Окатыши						
Поставщик 10	186 000	192 400	6 400	175 437	184 000	8 563
Поставщик 11	250 000	256 500	6 500	220 000	227 500	7 500
Поставщик 12	30 000	19 500	–10 500	30 000	18 437	–11 563
Сумма:	469 000	471 400	2 400	1 327 851	1 332 351	4 500
Кокс				364 220	364 220	
Кварцит	6 500	2 000	–4 500	6 500	2 000	–4 500
Всего покупного сырья	466 000	468 400	2 400	425 437	429 937	4 500

Как видно из таблиц 2 и 3 все изменения незначительные из-за жестких контрактных ограничений, возникающих из-за долгосрочных контрактов с ключевыми поставщиками сырья. Тем не менее, в первом месяце перераспределение сырья позволило сэкономить 15 млн руб. в доменном цехе и не дало экономии в агломерационном производстве. Во втором месяце экономический эффект в агломерационном производстве составил 49 млн руб., однако перераспределение долей закупаемых окатышей привело к убытку в 29 млн. руб. В итоге в представленном примере суммарный экономический эффект составил 34 млн руб. за два месяца. При этом следует учитывать, что все технологические параметры соответствуют нормам ведения доменного и агломерационного процесса.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Для интеграции всех разрабатываемых моделей и аналитических исследований в едином программном комплексе была создана автоматизированная информационная система (АИС) «Оптимальный чугун». Данная разработка стратегического уровня используется для оценки изменения себестоимости тонны стали в зависимости от изменения входных параметров, таких как прочность кокса на истирание и доля агломерата, загружаемого в печь.

Основу АИС «Оптимальный чугун» составляют зависимости удельного расхода кокса (УРК), производительности доменных печей (ПДП), стоимости тонны угольного и железорудного сырья от исходных варьируемых параметров. Ввиду большой «зашумленности» статистических данных для оценки УРК и ПДП использовался подход поиска неулучшаемых решений для режимов работы доменных печей при определенном значении интересующего параметра, реализуемый на основе методов кластерного анализа статистических данных [20]. Стоимость тонны сырья определяется исходя из различных вариантов оптимального расчета по моделям, описанным выше. Данный подход гарантирует также неулучшаемую (оптимальную) цену для определенных значений варьируемых параметров. Неулучшаемость в данном подходе подразумевает получение характеристик, являющихся наилучшими с точки зрения статистики работы доменных печей ОАО ММК.

На основе полученных зависимостей решаются три задачи оптимизации: максимум производства чугуна, минимум себестоимости чугуна и минимум себестоимости стали. Реализация интерфейса АИС «Оптимальный чугун» представлена на рисунке 1.

Интересным является тот факт, что себестоимость стали неоднозначно зависит от максимизации производства чугуна, либо снижения его себестоимости. При высокой стоимости лома выгоднее наращивать производство чугуна, несмотря на его себестоимость, и, наоборот, при низкой стоимости лома выгоднее снижать себестоимость чугуна, допуская снижение его производства.

	ДП1	ДП2	ДП4	ДП6	ДП7	ДП8	ДП9	ДП10	ДЦ
М10	7.66	8.02	8.02	8.02	8.20	8.20	8.20	8.54	8.11
Доля агломерата,%	65.40	66.40	65.40	64.40	65.40	65.40	64.40	66.40	65.40
Изменение производства чугуна, т/М3 сутки		-0.01		0.03			0.01	0.02	0.01
Изменение производства чугуна, %		-0.23		1.31			0.60	0.99	0.67
Изменение Удельного расхода кокса, кг/т		-3.32		-17.84			3.80	3.33	-3.51
Изменение стоимости угольной шихты, руб/т		79.33		79.33			-26.18	-41.45	22.76
Изменение стоимости железорудной шихты, руб/т		-34.59		8.76			8.78	-34.81	-12.96
Изменение себестоимости чугуна, руб/т		2.08		-57.98			0.20	-40.70	-24.10
Изменение себестоимости стали (ККЦ), руб/т									-30.63

Рис. 1. Интерфейс АИС «Оптимальный чугун»

Таким образом, АИС «Оптимальный чугун» выступает советчиком при принятии стратегических решений, интегрируя знания различных служб ОАО ММК о технологии, рыночной ситуации, статистике работы и планах производства.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Модель оптимизации привоза и потребления угольного сырья успешно завершила стадию опытно-промышленной эксплуатации в сентябре 2016 г. Данная модель используется в бизнес-процессе закупки угольной шихты, интегрируя знания и требования всех служб, вовлеченных в этот процесс в виде исходных данных и ограничений. Модель позволяет определить варианты долевого участия поставщиков угля в структуре угольной шихты, обеспечивающие минимальную цену шихты при желаемом качестве кокса и технологических ограничениях. Так же данная модель используется в качестве советчика при сравнении экономической эффективности различных вариантов долевого участия поставщиков в структуре угольной шихты, либо при оценке различных мероприятий, связанных с изменениями структуры шихты.
2. По состоянию на октябрь 2016 г. модель привоза и потребления железорудного сырья, находится в стадии опытно-промышленной эксплуатации. Планируется использование модели в бизнес-процессе закупки сырья для обеспечения минимально возможной стоимости сырья при соблюдении всех контрактных и технологических требований. Модель охватывает как агломерационный, так и доменный переделы и позволяет достигать максимального общего эффекта по агло-доменному производству. Модель так же может быть использована как советчик при управлении складами горно-обогатительного производства.
3. Разработана пилотная версия автоматизированной информационной системы-советчика «Оптимальный чугун». Данная система позволяет оценить показатели эффективности работы агло-кок-

со-доменного производства, включая ожидаемое изменение себестоимости стали, в зависимости от базовых показателей качества сырья, таких как прочность на истирание кокса (М10) или доля агломерата в железорудном сырье. Система основана на разработанном коллективом кафедры автоматики и управления НИУ ЮУрГУ (Челябинск) подходе поиска неулучшаемых решений для режимов работы доменных печей при определенном значении интересующего параметра, реализуемого на основе методов кластерного анализа статистических данных [20], а также описанных выше моделях оптимизации привоза и потребления угольного и железорудного сырья. Внедрение данной системы в промышленную эксплуатацию позволит повысить качество принимаемых управленческих решений, а также снизить время на их принятие. АИС «Оптимальный чугун» дает возможность использовать все доступные параметры для получения комплексного объективного решения.

Оценка потенциального экономического эффекта от внедрения всех разработанных систем составляет порядка 100 млн. руб. ежемесячно.

Список литературы

1. Корпоративная презентация ОАО ММК, Сентябрь 2016г.
2. Годовой отчет ОАО ММК за 2015 год
3. Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking / M.A. Diez, R. Alvarez, C. Barriocanal // International Journal of Coal Geology/ 2002. — № 50. — p. 389–412.
4. Исследование влияния реакционной способности и горячей прочности кокса на показатели работы доменных печей Магнитогорского металлургического комбината / Н.С. Штафиенко, А.В. Чевычелов, В.П. Гридасов и другие / Бюллетень «Чёрная металлургия». — 2009. — № 3. — с. 29–32.
5. Определение технологической ценности угольных концентратов для коксования / Е.Н. Степанов, Г.В. Ларин, А.Е. Степанова, И.В. Симеохина // Кокс и химия. — 2010. — № 2. — с. 2–7
6. Определение технологической ценности углей на основе математической модели прогноза показателей прочности и реакционной способности кокса из шихт с их участием / А.С. Станкевич, Ю.А. Золотухин // Кокс и химия. — 2015. — № 7. — с. 2–14.
7. О взаимосвязи качества кокса с основными технологическими показателями доменной плавки / Н.К. Беркутов, Ю.В. Степанов, Н.К. Попова и другие // Сталь. — 2007. — № 5. — с. 10–12.
8. Прогнозирование качества доменного кокса на основе лабораторных коксований углей / Е.В. Карунова, Н.Н. Суворин, Е.Н. Виноградова и другие // Чёрная металлургия. — 2015. — № 7. — с. 33–36.
9. Сравнительный анализ минералогического состава и металлургических свойств агломератов, полученных из железорудных шихт различных генетических типов / Н.Р. Мансурова, Т.Я. Малышева и другие // Металлург. — 2006. — № 10.
10. Механизм минералообразования и металлургические свойства агломератов основности 1,1–3,1 для шихтовых и технологических условий ММК / Т.Я. Малышева, Ю.С. Юсфин, Н.Р. Мансурова и другие // Сталь. — 2007. — № 2.
11. Окускованный, полностью офлюсованный железорудный материал для доменной плавки с лучшими металлургическими характеристиками агломерата и окатышей / Ф.М. Журавлёв, В.П. Лялюк, Д.А. Касим и другие // Чёрная металлургия. — 2015. — № 1. — с. 31–38.
12. Новая модель агломерационного процесса / Д.Р. Ганин, А.А. Панычев // Кокс и химия. — 2013. — № 5. — с. 44–47.
13. Анализ принципов построения математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса М25 и М10 с целью классификации и разработки концепции «гибридной модели» в порядке обсуждения / А.Н. Смирнов, В.Н. Петухов, Д.И. Алексеев // кокс и химия. — 2015. — № 5. — с. 13–18.
14. Проблемы оптимизации состава угольной шихты / В.П. Лялюк, Д.А. Касим, И.А. Ляхова, Е.А. Шмельцер // Кокс и химия. — 2014. — № 1. — с. 22–28.
15. Использование современных информационных технологий для анализа и контроля доменного процесса / А.Н. Дмитриев, Н.А. Спирин // Чёрная металлургия. — 2014. — № 1. — с. 21–25.

16. Coal Blend Optimization for Horizontal Heat Recovery Coke Plant / J. Perkins, B. Molnar, V. King et. al. // AISTech 2012 ICSTI Proceedings. C. 2308-2317.
17. Оптимизация качества кокса ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» с учётом особенностей угольной сырьевой базы / А.С. Станкевич, А.Е. Багезский // Кокс и химия. — 2013. — № 10. — с. 14–21.
18. Спирин Н.А., Ипатов Ю.В., Лобанов В.И. и др. Информационные системы в металлургии / под ред. Н.А. Спирина. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. — 617 с.
19. Спирин Н.А., Лавров В.В., Паршаков С.И., Денисенко С.Г. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / под ред. Н.А. Спирина. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. — 307 с.
20. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Identification method of blast-furnace process parameters // V International Conference for young scientists «High Technology: Research and Applications 2015 (HTRA 2015), Key Engineering Materials», Vol. 685, pp. 137–141, Mar. 2016 DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.137

Д.А. Шнайдер, А.А. Полинов, А.В. Колосов, А.В. Павлов, И.Е. Прохоров, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск,
Казаринов Л.С., Барбасова Т.А., Колесникова О.В., Басалаев А.А., ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), г. Челябинск

МОДЕЛЬНО-УПРЕЖДАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ СОСТОЯНИЕМ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ НА ОСНОВЕ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ЭФФЕКТИВНОЙ МНОГОМЕРНОЙ ОБЛАСТИ

АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается задача автоматизации оперативного управления тепловым состоянием доменной печи с использованием методов, основанных на моделировании и выработки упреждающих решений в реальном времени on-line с объектом управления. Характерными особенностями создаваемой системы оперативного управления являются:

- использование программных средств анализа статистических данных эксплуатации (Data Mining) для выявления эффективных областей значений режимных параметров печи;
- прогнозирование динамики изменения индикаторов теплового состояния печи при изменениях параметров дутья и загружаемых шихтовых материалов;
- интеграция с программой идентификации в реальном времени текущих параметров зоны когезии доменного процесса для коррекции управляющих воздействий [12].

В результате применения указанных программных средств достигается выведение режимных параметров доменного процесса в эффективную область значений повышенной производительности и снижение расхода кокса при значительных изменениях исходных параметров шихты. При этом прогнозирование динамики режимных параметров позволяет мастеру стабилизировать доменный процесс в эффективной области их значений.

Система реализуется на базе программно-технического комплекса (ПТК) «ПолиТЭР-Домна», совместной разработки Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (г. Челябинск), ООО НПП «Политех-Автоматика» (г. Челябинск) и ООО «АКОММ» (г. Москва).

ВВЕДЕНИЕ

Перспективным направлением работ по повышению эффективности оперативного управления доменными процессами в настоящее время является применение методов, основанных на моделировании и выработки на этой основе упреждающих решений.

В общем плане использование моделей доменного процесса для повышения его эффективности имеет большую историю и по данной проблеме имеется обширная литература. Среди работ отечественных авторов следует отметить работы Гиммельфарба А.А., Готлиба А.Д., Дмитриева А.Н. Ефименко Г.Г., Онорина О.П., Похвиснева А.Н., Спирина Н.А., Рамма А.Н., Товаровского И.Г. [1–26]. Представляют значительный интерес работы Паршакова В.М. [12–15], посвященные исследованию влияния параметров зоны когезии на эффективность доменного процесса. Среди иностранных авторов следует отметить работы Kule J., Sasaki M., Ono K., Suzuki A., Burgess J.M., Jenkins D.R., Hockings K.L., Kumar S.A., Suresh N., Jeffreson C.P., Gobetto M. [27–41].

Однако, вследствие сложности доменного процесса и неполной наблюдаемости параметров режимов указанная задача еще решена недостаточно полно, работы в данной области продолжаются.

Особенностями подхода, предлагаемого в данной работе являются:

- использование программных средств анализа статистических данных эксплуатации (Data Mining) для выявления эффективных областей значений режимных параметров печи, обеспечивающих повышение производительности и снижение расхода кокса;
- наличие программы идентификации в реальном времени текущих параметров зоны когезии печи для коррекции оперативного управления доменным процессом с целью повышения его эффективности;
- прогнозирование динамики изменения индикаторов теплового состояния печи при изменениях параметров дутья и загрузки шихтовых материалов.

ОБЩАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ МОДЕЛЬНО-УПРЕЖДАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОЦЕССОМ

Основными трудностями, препятствующими достижению высоких показателей технико-экономической эффективности технологических процессов, являются:

1) неполная наблюдаемость и управляемость процессов;
2) необходимость стабилизации процессов в экстремальных граничных условиях;
3) неполнота знания о текущих состояниях процессов вследствие их сложности.

Для преодоления указанных трудностей в настоящее время в промышленно развитых странах развивается передовая методология модельно-упреждающего управления. Особенность этой методологии состоит в том, что для обеспечения управляемости и наблюдаемости процессов используются программные модели объекта управления, которые постоянно обновляются on-line с реальным объектом управления на основе процедур непрерывной идентификации их параметров по текущим реальным данным эксплуатации. При этом на каждом такте управления, решается задача оптимизации управляющих воздействий по технико-экономическим показателям.

Обобщенная структура системы модельно-упреждающего управления доменным процессом представлена на рис. 1.

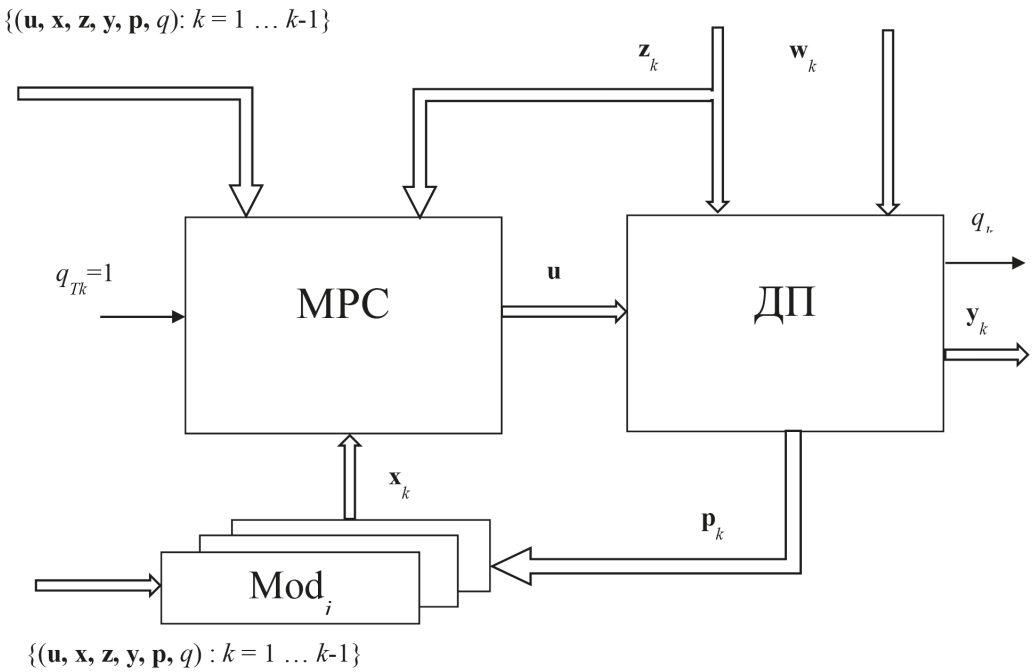


Рис. 1. Структура системы модельно-упреждающего управления доменным процессом

Здесь $\mathbf{u}_k$ — управляемые параметры доменного процесса (ДП); $\mathbf{z}_k$ — измеряемые неуправляемые параметры ДП; $\mathbf{w}_k$ — неизмеряемые возмущающие факторы ДП; q_k — показатель технико-экономической эффективности доменного процесса:

$$q_k = \begin{cases} 1, & \text{если доменный процесс удовлетворяет} \\ & \text{заданным показателям эффективности;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

$\mathbf{y}_k$ — выходные измеряемые параметры доменного процесса; $\mathbf{x}_k$ — вектор состояния доменного процесса, на основе которого обеспечивается удовлетворительный прогноз его характеристик; $\mathbf{p}_k$ — измеряемые параметры доменного процесса, используемые для оценки его вектора состояния; {(**u, x, z, y, p,** q): k = 1 … k–1} — предыдущая статистика параметров доменных плавок; $\mathbf{Mod}_i$ — соответствующие нормативным технологическим инструкциям i-е модельные представления доменного процесса, которые обеспечивают оценку значений его вектора состояний; **МРС** — программа вычисления модельно-упреждающего управления; k — индекс текущего выпуска.

В качестве одного из модельных представлений доменного процесса, обеспечивающего оценку значений его вектора состояний, рассматривается система «Когезия» ООО «АКОММ», в которой производится количественная оценка параметров зоны плавления [12].

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ЗНАЧЕНИЙ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Эффективные области значений режимных параметров определяются исходя из заданных целевых значений показателей доменной плавки, таких как производительность, потребление кокса, теоретическая температура горения, индикаторы теплового состояния печи (содержание *Si* в чугуне, титановый модуль, степень использования колошникового газа и др.).

Например, на рис. 2 представлена эффективная область, выбранная с использованием целевой функции:

$$э_ц = \alpha_п п_ч + \alpha_к в_к^{-1},\ \alpha_п,\ \alpha_к \geq 0,\ \alpha_п + \alpha_к = 1,$$

где $п_ч$ — относительная производительность по чугуну; $в_к$ — относительный удельный расход кокса; $\alpha_п$, $\alpha_к$ — веса частных показателей *п* и *к* соответственно в составе обобщенного целевого показателя, отражающие важность учета производительности и экономии кокса в составе общего целевого показателя. Цветом на рис. 2 условно выделены три целевые зоны (кластеры) с наибольшей (красный), средней (зеленый) и низкой (черный) эффективностью для выбранной целевой функции.

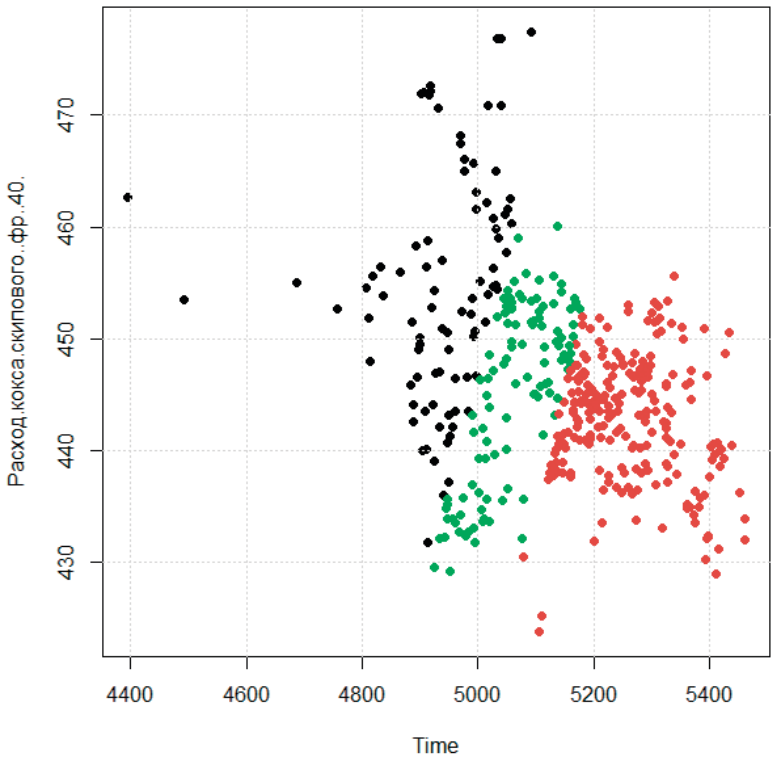


Рис. 2

Сложность рассматриваемой задачи кластеризации эффективной области значений режимных параметров в соответствии с разбиением на целевые зоны, определяемые заданными уровнями целевой функции (рис. 2), состоит в ее высокой размерности. В рассматриваемой задаче число режимных параметров составляет более 70 и включает параметры качества кокса, агломерата, состава шихты, химического состава шлака, чугуна, характеристики горячего дутья и др. параметры. Для упрощения решения задачи в работе использовался метод декомпозиции точной области на двумерные сечения, аналитически описываемые эллиптическими областями второго порядка [42–44].

На рис. 3 приведен пример области повышенной эффективности в координатах «расход удельного кокса — содержание *Si* в чугуне» при ограничениях по тепловому состоянию печи.

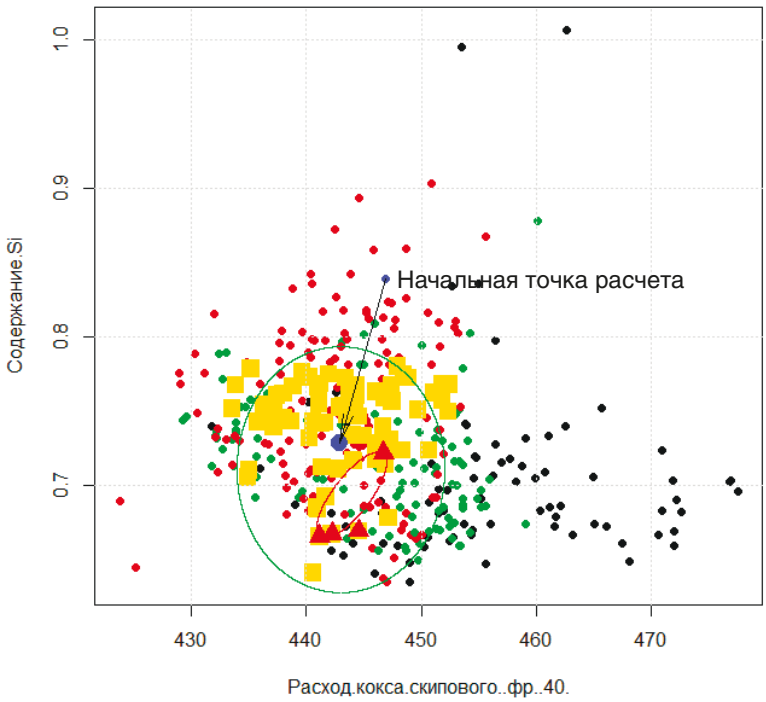


Рис. 3. Определения кластера целевого режима работы доменной печи по содержанию Si и расходу кокса

Базовая задача выбора эффективных решений состоит в выборе значений управляемых параметров ДП $\{x_i : i \in I_y\}$ при заданных ограничениях на неуправляемые параметры $\{x_i : i \in I_н\}$. В общем случае точные значения неуправляемых параметров неизвестны, и они задаются в виде областей возможных значений. В качестве примера в таблицах 1 и 2 представлены перечни управляемых и неуправляемых (заданные при оперативном управлении) параметров, которые могут быть откорректированы с учетом особенностей каждой конкретной реализации системы управления доменной печью.

Таблица 1. Управляемые параметры

	Параметр	Ед. измерения
$\{x_1 : i \in I_y\}$	Расход кокса скипового (фр.+40) (абс)	кг/т
$\{x_2 : i \in I_y\}$	Влажность дутья	т/м^3
$\{x_3 : i \in I_y\}$	Расход природного газа	м^3/ч

Таблица 2. Неуправляемые параметры

	Параметр	Ед. измерения
$\{x_4 : i \in I_н\}$	Содержание кислорода в горячем дутье (только на понижение)	%
$\{x_5 : i \in I_н\}$	Доля Соколовских окатышей в шихте	доли
$\{x_6 : i \in I_н\}$	Доля Михайловских окатышей в шихте	доли
$\{x_7 : i \in I_н\}$	Доля Лебединских окатышей в шихте	доли
$\{x_8 : i \in I_н\}$	Доля Костомукшских окатышей в шихте	доли
$\{x_9 : i \in I_н\}$	Доля Костомукшских неофлюсованных окатышей в шихте	доли
$\{x_{10} : i \in I_н\}$	Доля агломерата	доли

Для решения указанной задачи формулируется квадратичная невязка решения системы неравенств:

$$E_{\text{св}}^2 = 0{,}5\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\left(f_{ij}(x_i,\, x_j)\right)^+\right)^2, \tag{1}$$

$$\left(f_{ij}(x_i,\, x_j)\right)^+ = \begin{cases} f_{ij}(x_i,\, x_j), & \text{при} \quad f_{ij}(x_i,\, x_j) > 0; \\ 0, & \text{при} \quad f_{ij}(x_i,\, x_j) \le 0. \end{cases} \tag{2}$$

где f_{ij} — дискриминантные функции, аналитически описывающие эффективные области параметров ДП.

На допустимые значения параметров накладываются ограничения в виде неравенств:

$$x_i^{\min} \le x_i \le x_i^{\max}, \quad i \in I. \tag{3}$$

Квадратичная невязка ограничений (3):

$$E_x^2 = 0{,}5\sum_{i=1}^{n}\left(\left(\left(-x_i + x_i^{\min}\right)^+\right)^2 + \left(\left(x_i - x_i^{\max}\right)^+\right)^2\right). \tag{4}$$

Невязка решения (1) строится на основе статистики наблюдения за технологическим процессом. Данная статистика может быть неполной. В этом случае постановка задачи минимизации невязки решения будет некорректной. С целью регуляризации постановки задачи введем дополнительное ограничение:

$$E_R^2 = 0{,}5\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - x_{Ri}\right)^2. \tag{5}$$

Здесь $\{x_{Ri}\}$ — допустимые значения режимных параметров, используемые для регуляризации; например, базовые значения параметров, полученные на основе технологических расчетов. Использование регуляризации является центральным моментом предлагаемого подхода и на её основе осуществляется согласование решений, получаемых на основе данных эксплуатации, и данных технологических расчетов.

Общая невязка решения неравенств (3) с учетом ограничения (5) формулируется в виде штрафной функции:

$$E_0^2 = (1-\alpha)E_{\text{св}}^2 + \lambda E_x^2 + \alpha E_R^2. \tag{6}$$

Ставится задача: найти допустимое значение управляемых параметров по критерию минимума невязки ограничений (1) при условии, что неуправляемые параметры в пределах заданных ограничений стремятся обеспечить максимум указанной невязки. Данная задача представляет собой минимаксную задачу математического программирования

$$\min_{\{x_i \in I_y\}} \max_{\{x_i \in I_н\}} E_{\text{св}}^2(\{x_i :\ i \in I\}). \tag{7}$$

Решение задачи (7) в целом будем осуществлять градиентным методом. В этом случае вычислительные соотношения для решения задачи будут иметь вид:

$$x_{i,k+1} = x_{i,k} - \gamma\left(\frac{\partial E_{\text{св}}^2}{\partial x_i} + \lambda\frac{\partial E_x^2}{\partial x_i} + \alpha\frac{\partial E_R^2}{\partial x_i}\right),\ i \in I_y;$$

$$x_{i,k+1} = x_{i,k} - \gamma\left(-\frac{\partial E_{\text{св}}^2}{\partial x_i} + \lambda\frac{\partial E_x^2}{\partial x_i} + \alpha\frac{\partial E_R^2}{\partial x_i}\right),\ i \in I_н;$$

$$\frac{\partial E_{\text{св}}^2}{\partial x_i} = f_{ii}^+\frac{y_i}{\sigma_i^2} + \sum_{\substack{j=1 \\ j\ne i}}^{n} f_{ij}^+\left(\frac{y_i}{\sigma_i^2}b_{ii}^{(11)} + \frac{y_j}{\sigma_j^2}b_{ji}^{(21)}\right) + \sum_{\substack{k=1 \\ k\ne i}}^{n} f_{ki}^+\left(\frac{y_k}{\sigma_k^2}b_{ki}^{(12)} + \frac{y_i}{\sigma_i^2}b_{ii}^{(22)}\right);$$

$$\frac{\partial E_x^2}{\partial x_i} = \left((-x_i + x_i^{\min})^+ + (x_i - x_i^{\max})^+\right);$$

$$\frac{\partial E_R^2}{\partial x_i} = x_i - x_{Ri}\,.$$

Если рекуррентный процесс сходится, то в результате получаем обобщенное решение задачи (7) при заданных ограничениях.

Для тестирования алгоритмов модельно-упреждающего управления доменным процессом ежедневно формируются отчетные формы с указанием параметров технологических показателей текущих суток, включая целевые показатели и факторы адаптивного управления. На основе отчетных форм проводится сравнение фактических значений факторов, влияющих на эффективность доменного процесса с эффективным режимом.

Отработка разработанных алгоритмов на базе моделей производится в ПТК «ПолиТЭР-Домна» для уточнения области «высокого качества» по тепловому состоянию с включением эффективных значений текущего режима.

Кроме того, при решении задачи оптимизации режимов работы доменной печи был использован подход на основе построения множества неулучшаемых (Парето-оптимальных) решений.

В качестве целевой функции был использован минимум расхода кокса. Вычисления производились для зависимостей $П_ч(P_к, W_{пара})$, $Si(W_{пара})$, $M10(W_{пара})$, $W_{пара}$ при задании требуемого режима работы доменной печи, при этом в качестве ограничений по тепловому состоянию рассматривались различные диапазоны для [*Si*].

На рис. 4 представлена полученная зависимость неулучшаемых оптимальных значений производительности чугуна от качества кокса по *M10*. Как видно из графика, с уменьшением *M10* производительность чугуна растет, при этом по мере снижения *M10* скорость роста производительности существенно замедляется. Особенно это проявляется при значениях *M10*, близких к 8,0–8,2.

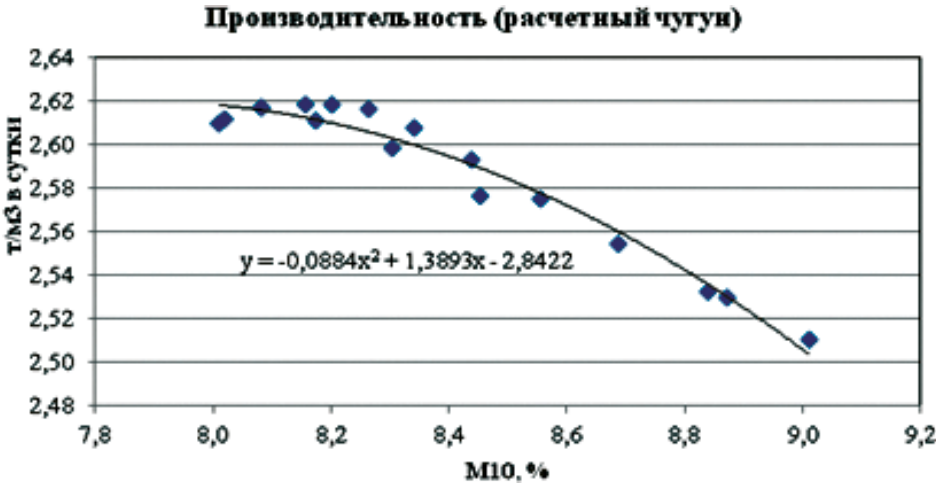


Рис. 4. Зависимость неулучшаемых оптимальных значений производительности чугуна от качества кокса по M10

На рис. 5 представлена полученная зависимость неулучшаемых оптимальных значений расхода кокса от качества кокса по показателю *M10*.

С уменьшением *M10* расход кокса уменьшается, причем существенного замедления скорости уменьшения расхода кокса при снижении *M10* не наблюдается.

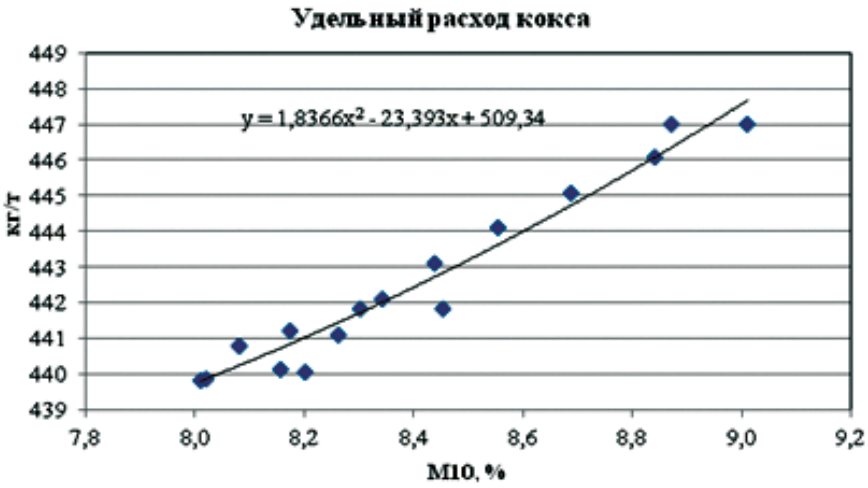


Рис. 5. Зависимость неулучшаемых оптимальных значений расхода кокса от качества кокса по показателю М10

Зависимости, приведенные на рис. 4–5, построены при обработке статистической информации за период с 12.04.2014 по 07.02.2016 ДП №10 ОАО «ММК» за исключением периодов с простоями.

ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДП В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Решение задачи оперативного управления ДП производится с точки зрения динамики стабилизации режимных параметров в заданных областях повышенной эффективности. Решение данной задачи представляет большие трудности, т.к. доменный процесс как объект управления обладает весьма сложными свойствами:

1) динамикой ДП, развивающейся на длительных интервалах времени (до 40 часов);
2) нелинейными нестационарными характеристиками;
3) распределенными параметрами;
4) большим уровнем возмущающих воздействий;
5) отсутствием наблюдаемости многих характеристик процесса.

Рассмотрим методику оперативного управления тепловым состоянием доменной печи. Для иллюстрации методики рассмотрим управление на примере регулирования содержания [*Si*] в чугуне по каналу влияния удельного расхода кокса ($B_{кокс}$).

Передаточная функция зависимости содержания [*Si*] в чугуне от удельного расхода кокса может быть представлена в виде двух последовательных динамических запаздываний: транспортного и инерционного.

Транспортное запаздывание оценивается на основе вычисления корреляционной функции зависимости содержания [*Si*] в чугуне от $B_{кокс}$. По расчету максимума корреляционной функции можно оценить величину транспортного запаздывания.

Далее, инерционное запаздывание описывается рекуррентной формулой

$$Si_k = aSi_{k-1} + bB_{кокс\,k}, \qquad (8)$$

где *a*, *b* — неизвестные коэффициенты, настраиваемые по текущим данным эксплуатации; *k* — текущий момент времени.

Идентификация коэффициентов *a*, *b* осуществляется по синхронизированным данным эксплуатации по [*Si*] и $B_{кокс}$ в реальном времени.

Для задачи регулирования уровня [*Si*] по рекуррентному соотношению (8) рассчитывается необходимая коррекция подачи кокса, исходя из условия достижения требуемого уровня содержания [*Si*] в чугу-

не. Требуемая величина содержания [*Si*] задается на основе ранее рассмотренной задачи оптимизации на основе использования кластеров эффективного режима ДП.

В настоящее время реализовано оперативное управление по следующим параметрам: содержание кремния в чугуне, температура чугуна, титановый модуль, температура шахты печи, температура горна печи.

Видеокадр работы ПТК «ПолиТЭР-Домна» приведен на рис. 6.

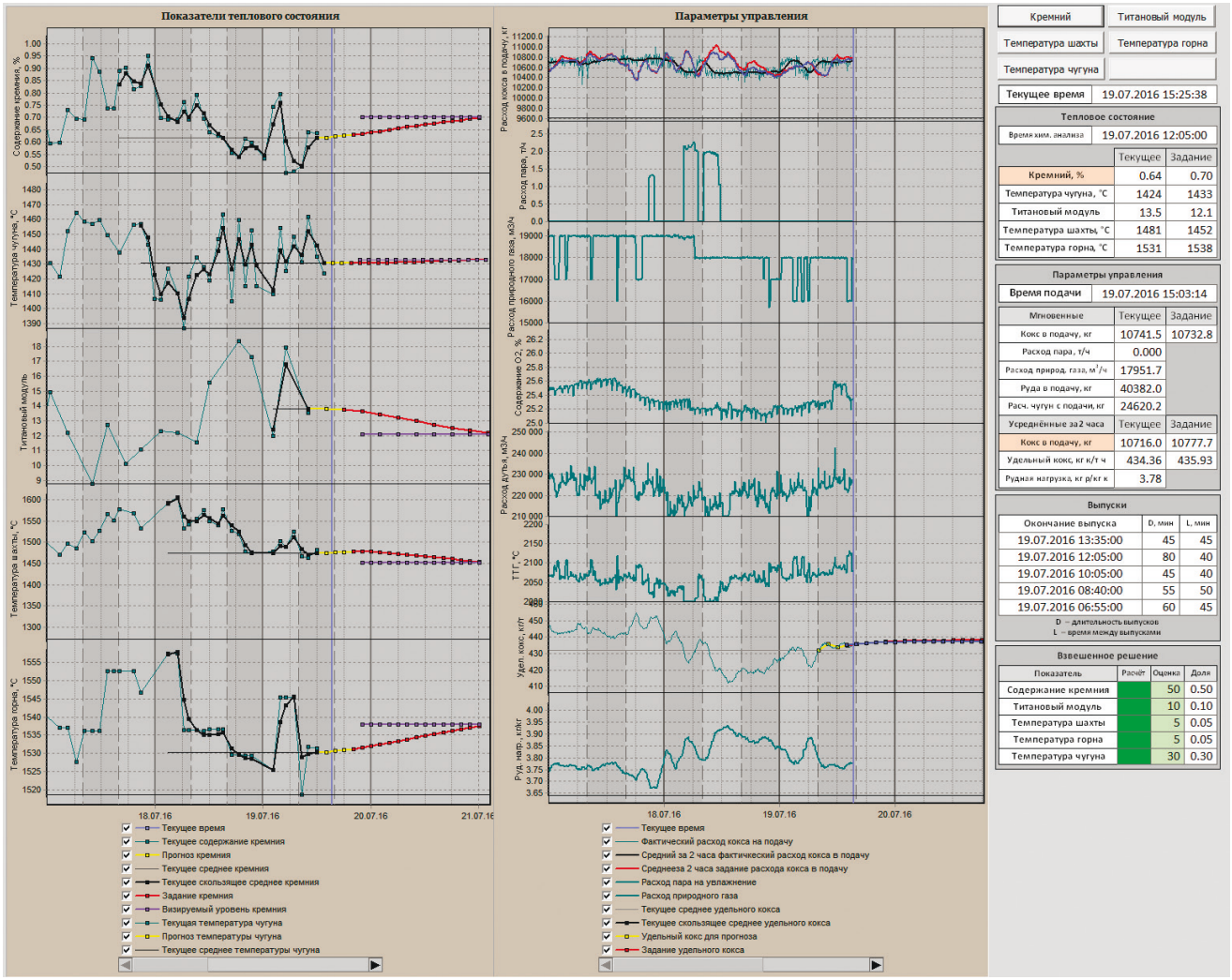


Рис. 6. Видеокадр работы ПТК «ПолиТЭР-Домна»

В левой части мнемосхемы приведены графики изменения показателей теплового состояния ДП: содержание кремния в чугуне, температура чугуна, титановый модуль, температура шахты и температура горна. Здесь для каждого из указанных показателей приводятся текущие значения (серо-зеленый цвет), отфильтрованные текущие значения (черный цвет), прогнозные значения (желтый цвет), задание (красный цвет) и его визируемый уровень (фиолетовый цвет).

В средней части приводятся графики изменения текущих значений параметров управления: расход пара на увлажнение, расход природного газа, содержание кислорода в дутье, расход дутья, теоретическая температура горения, а также усредненных за 2 часа значений параметров управления: расход кокса в подачу, удельный расход кокса на 1 тонну расчетного чугуна, рудная нагрузка. Кроме того, для удельного расхода кокса приведены графики задания:

1) определенного на основе требуемого значения содержания кремния в чугуне (красная линия);
2) полученного на основе взвешенного решения (синяя линия). Взвешенное решение находится с использованием заданий удельного кокса, определенных на основе требуемых значений показателей теплового состояния ДП.

На основе приведенных на видеокадрах графиков определяется расход кокса в подачу с учетом текущего расчетного выхода чугуна из подачи.

ВЫВОДЫ

1. Для повышения эффективности доменного процесса предложен подход модельно-упреждающего управления, основанный на кластеризации областей эффективных значений параметров доменного процесса и оперативной стабилизации параметров в рамках эффективного кластера с использованием прогноза их динамики.
2. Поставлена задача и дано ее алгоритмическое решение по оптимальному выбору управляемых параметров доменного процесса при возможных вариациях неуправляемых параметров с использованием многомерных областей эффективных значений параметров.
3. Показано, что с использованием областей эффективных характеристик в координатах параметров доменного процесса, полученных на основе решения задачи оптимизации, можно оценить потенциальные границы достижения высоких показателей эффективности в зависимости от режимных параметров. Полученные зависимости неулучшаемых оптимальных значений по производительности доменной печи и удельному расходу кокса от качества кокса по показателю М10 можно использовать для технологических расчетов параметров режимов с оценкой потенциальной достижимости эффективных значений.
4. Стабилизацию режимных параметров доменного процесса целесообразно осуществлять на основе прогнозирования динамики изменения индикаторов теплового состояния печи при изменениях параметров дутья и загрузки шихтовых материалов. Разработаны алгоритмы идентификации текущих значений параметров прогнозирующих моделей в реальном времени.
5. На основе разработанного методического и алгоритмического обеспечения реализована пилотная версия автоматизированной системы поддержки принятия решений по оперативному управлению доменным процессом на основе программно-технического комплекса «ПолиТЭР-Домна» и внедрена в тестовую эксплуатацию на доменной печи №10 ОАО «ММК».

Литература

1. Полянский Г.А., Набока В.И., Фоменко А.П., Крутас Н.В. Математическая модель контроля и прогнозирования хода доменного процесса // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр. — Днепропетровск, 2008. — Вып. 16.
2. Похвиснев А.Н., Воловик Г.А. К вопросу о регулировании хода доменной печи по анализу колошникового газа // Научные исследования в помощь доменному производству (сборник трудов) — Днепропетровское книжное издательство. — 1960. — С. 107–114.
3. Похвиснев А.Н. Управление доменным процессом по изменению состава колошникового газа // Теория и практика металлургии. —1939. — № 8. — С. 15–19.
4. Готлиб А.Д., Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А. Основы автоматического регулирования доменного процесса // В кн.: Доменный процесс по новейшим исследованиям. — М.: Металлургиздат, 1963. — С. 285–295.
5. Гиммельфарб А.А., Ефименко Г.Г. Автоматическое управление доменным процессом. — М.: Металлургия, 1969.
6. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Монография, 2-е издание, и уточненное, Дніпропетровськ, «ПОРОГИ», 2009.

7. Павлов М.А. Металлургия чугуна. Ч. 2. Доменный процесс. — Издание шестое. — М.: Металлургиздат, 1949. — 628 с.
8. Товаровский И.Г. Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса. — М.: Металлургия, 1987. — 192 с.
9. Готлиб А.Д. О «принципе М.А. Павлова» // Исследование доменного процесса: Сборник трудов. — М.: Изд. АН СССР. — 1957. — С. 24–32.
10. Рамм А.Н. О влиянии интенсивности плавки на производительность доменных печей и относительный расход кокса / Исследование доменного процесса: Сб. научн. тр. / АН СССР. — М.: Изд. АН СССР. — 1957. — С. 85–87.
11. Рамм А.Н. Современный доменный процесс / А.Н. Рамм. М.: Металлургия. 1980. — 304 с.
12. Паршаков В.М., Каширская Т.Ю., Заболотских В.А. Двумерная модель теплообмена в доменной печи. Теплотехническое обеспечение основных технологических процессов чёрной металлургии. Сборник трудов. М.: «Металлургия», 1988, с. 22–25.
13. В.М. Паршаков. Повышение эффективности использования пылеугольного топлива в доменной печи. «Сталь», 2005, № 8, с. 32–37.
14. В.М. Паршаков, А.А. Третяк, А.П. Уланов. АСУ ТП доменной плавки и её технологическое насыщение. Доменное производство — XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков. — М.: Издательский дом «Кодекс», 2010. — С. 391–413.
15. «Внедрение системы оперативного автоматического определения зоны плавления в доменной печи в составе АСУ ТП ДП-2». Заключительный отчет. ООО «АКОММ». Руководитель В.М. Паршаков. Москва, 2015 г.
16. Спирин Н.А., Ипатов Ю.В., Лобанов В.И. и др. Информационные системы в металлургии / под ред. Н.А. Спирина. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. — 617 с.
17. Спирин Н.А., Лавров В.В., Паршаков С.И., Денисенко С.Г. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / под ред. Н.А. Спирина. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. — 307 с.
18. Товаровский И.Г. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность. // Сталь, № 5, 2014. — С. 4–11
19. Парсункин Б.Н., Сеничкин Б.К., Андреев С.М., Рябчиков М.Ю. Gовышение производительности доменной печи при оптимизации автоматического управления подачей природного газа и технического кислорода в дутье // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2011. № 4. — С. 73–77.
20. Онорин О.П., Спирин Н.А., Терентьев В.Л., Гилева Л.Ю., Рыболовлев В.Ю и др. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / под ред. Н.А. Спирина. — Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2005. — 301 с.
21. Жеребин Б.Н. Практика ведения доменной печи / Б.Н. Жеребин. М.: Металлургия, 1980. — 248 с.
22. Товаровский И.Г. Применение математических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом/ Товаровский И.Г., Е.И. Райх, К.К. Шкодин и др. М.: Металлургия, 1978, — 204 с.
23. Авдеев В.П. Идентификация промышленных объектов с учетом нестационарностей и обратных связей / В.П. Авдеев, Т.М. Даниелян, П.Г. Белоусов. Новокузнецк: СибМИ, 1984. — 88 с.
24. Сучков А.В. Соверенствование управления многомерными технологическим объектом на примере доменной печи: монография / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко, В.А. Сучков. Екатринбург: УрФУ, 2012. — 126 с.
25. Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, О.П. Онорин. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 545 с.
26. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Т. 2. Кн. 1. Новые способы, модельные и экспериментальные исследования: монография / В.Г. Лисиенко. — Екатеринбург: УрФУ, 2013. — 592 с.
27. Blast furnace Phenomena and modelling / Ed. By Yasuo Omori. Elsevier applied science. — London and New York, 1987. — 631 p.
28. Sasaki M., Ono K., Suzuki A. Formation and Melt-down of Softening-Melting Zone in Blast Furnace // Trans. Of the Iron and Steel Inst. Jap. — 1977. — Vol. 17. — № 7. — P. 391–400.

29. Analysis of Blast Furnace Pressure Tappings, using a Cohesive-zone Gas-distribution Model / J.M. Burgess, D.R.Jenkins, K.L.Hockings // Ironmakinf and Steelmaking. — 1984. — Vol. 11. — № 5. — P. 253–261.
30. Estimation of Lower Limit of Fuel Rate in Blast Furnace by Mathematical Model / Y. Togino, M. Sugata, K. Yamaguchi // Trans. of the Iron and Steel Inst. Jap. — 1980. — Vol. 20. — № 9. — P. 639–645.
31. Two-dimensional Simulation on the Gas Flow and Heat Transfer in the Blast Furnace / J. Yagi, K.Takeda, Y.Omori et al.// // Trans. of the Iron and Steel Inst. Jap. — 1983. — Vol. 22. — № 11. — P. 884–892.
32. Development of Measuring Technique for Coheszive Zone and its Application Process in Ohgishima Blast Furnace / T. Fukushima, T. Fukyama, Y. Yamada et al. // Trans. of the Iron and Steel Inst. Jap. — 1982. — Vol. 22. — № 10. — P. 807–810.
33. Sugiama T., Yagi J.,Omori Y. A Theoretical Analisis on Gas Flow and Heat Transfer in Packed Beds with Fused and Unfused Layers // Tetsu-to-Hagane. Jorn. Of the Iron and Steel Inst. Jap. — 1978. — Vol. 64. — № 12. — P. 1676–1684.
34. Kule J. Blast Furnace model development and application in the British Steel Corporation // «Ind. Use Thermochem.Data Proc. Conf., Univ. Surrey. Sept. 11th–13th.1979». — London. — 1980. — P. 403–415.
35. Yagi J. Mathematical Models of the Blast Furnace Process // Tetsu-to-Hagane. — 1983. — № 10. — P. 1242–1249.
36. Kumar S.A., Suresh N. Production and Operations Management. New Age International (P) Ltd., 2009. 284 p.
37. Modrak V., Pandian R.S. Operations Management Research and Cellular Manufacturing Systems: Innovative Methods and Approaches. IGI Global Snippet, 2011. 456 p.
38. Gobetto M. Operations Management in Automotive Industries: From Industrial Strategies to Production Resources Management, Through the Industrialization Process. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2014. XXII, 245 p.
39. Kwakernaak H., Tijssen P., Strijbos R.C.W. Optimal operation of blast furnace stoves // Automatica. 1970. V. 6, I. 1, P. 33–40.
40. Jeffreson C.P. Feedforward control of blast furnace stoves // Automatica. 1979. V.15, I. 2. P. 149–159.
41. Garry A. Labossiere, Peter L. Lee Model-based control of a blast furnace stove rig // Journal of Process Control. 1991. V. 1, I. 4. P. 217–227.
42. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Oblong ellipsoid method in process efficiency control 2015, International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) Tomsk, Russia 2015. Pages 1–5. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414875.
43. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Identification method of blast-furnace process parameters // V International Conference for young scientists «High Technology: Research and Applications 2015 (HTRA 2015), Key Engineering Materials, Vol. 685, pp. 137–141, Mar. 2016 DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.137
44. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А. Метод эллиптических центроидов в управлении эффективностью технологических процессов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2015. Т. 15. — № 1. — С. 152–155.

Ю.А. Фролов, ОАО «Уралэлектро»
СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА АГЛОМЕРАТА 406

Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, НИТУ «МИСиС»
А.Н. Шаповалов, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»
НОВЫЙ ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ДОБАВОК В АГЛОМЕРАЦИОННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 433

Д.Р. Ганин, А.А. Панычев, А.Н. Шаповалов, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»
В.Г. Дружков, МГТУ
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА ВВЕДЕНИЕМ В ШИХТУ ДОБАВОК-АКТИВАТОРОВ В ВИДЕ ПУЛЬПЫ В ПРОЦЕССЕ ОКОМКОВАНИЯ..... 439

Сергатов В.А., Давидченко В.М., ООО «Фирма Системосервис»
Третяк А.А., ООО Фирма «ТАЛС-1»
ГОРЕЛКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В АГЛО-ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 448

А.Н. Симоненко, ООО «Интер-С Груп»
ТЯГОДУТЬЕВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ 463

А.А. Шульга, ПАО «ЕВРАЗ ДНКХЗ»
МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И УСЛОВИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В УСЛОВИЯХ МЕЖБАССЕЙНОВОЙ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ПАО «ЕВРАЗ ДНКХЗ»..... 466

А.В. Козуб, А.И. Панченко, АО «МГОК», Н.Т. Эфендиев, Р.И. Исмагилов, УК «Металлоинвест»
А.А. Солодухин, В.А. Горбачев, ООО «НПВП ТОРЭКС», Ю.А. Чесноков, УрО РАН
УПРАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ КАК ОСНОВА СТРАТЕГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА..... 476

Раздел VI
ПОДГОТОВКА ДОМЕННОЙ ШИХТЫ

А.А. Елисеев, Т.В. Деткова, В.Ю. Кучин, ПАО «Северсталь»
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ГОРЯЧЕЙ ПРОЧНОСТИ АГЛОМЕРАТОВ РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА 484

Т.Я. Малышева, В.Б. Горбунов, Г.С. Подгородецкий, С.А. Писарев, НИТУ «МИСиС»
РОЛЬ ЖЕЛЕЗА МАГНЕТИТА В АГЛОМЕРАЦИИ КАК РАЗВИТИЕ ГЕОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРОЦЕССЕ 490

В.А. Кобелев, М.В. Мамаев, Д.Ю. Дунцев, ООО «Промынтех-НКА»,
И.П. Беликов, ООО «Башминералресурс», Г.А. Нечкин, ОАО «Уральский институт металлов»
ПРИМЕНЕНИЕ МАРГАНЦЕВОГО ИЗВЕСТНЯКА В КАЧЕСТВЕ ФЛЮСУЮЩЕЙ ДОБАВКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОКАТЫШЕЙ 493

Г.Г. Валявин, Л.А. Смирнов, А.Ю. Чернавин, ОАО «Уральский институт металлов»
М.И. Стуков, М.В. Мамаев, ООО «Промынтех»
ПЕРСПЕКТИВЫ КОКСОДОМЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕФТЕУГОЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ 498

Д.А. Чернавин, А.Ю. Чернавин, ОАО «Уральский институт металлов»
М.И. Стуков, ООО «Промынтех-НКА», М.В. Зорин, УрФУ им. Б.Н. Ельцина
РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВА ДОМЕННОЙ ШИХТЫ С КОКСОВЫМИ НАСАДКАМИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ДОЛЕ В НИХ НЕФТЕУГЛЕРОДА 506

Ю.А. Фролов, ОАО «Уралэлектро»

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА АГЛОМЕРАТА

ПРИЕМ И СКЛАДИРОВАНИЕ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Оптимальный объем запасов сырьевых материалов определяется требованиями доменного процесса к качественным характеристикам агломерата и, прежде всего, к колеблемости его физико-химических свойств. По данным работы [1] зависимость колеблемости химического состава агломерата от емкости штабеля носит экстремальный характер: она снижается до емкости штабеля 80–100 тыс. т и вновь возрастает при росте последней. Увеличение доли влажного концентрата в штабеле объемом 70 тыс. т от 55 до 80% приводит к уменьшению коэффициента усреднения смеси от 1,5 до 1,2 ед. Причинами этого являются сегрегация материалов по крупности и химсоставу при засыпке на наклонную поверхность, их слеживание. Каждый 1% увеличения доли железной руды (от 45 до 70%) в штабеле концентрата сопровождается повышением степени усреднения на 4%. Снижение максимальной крупности руды до 6 мм обеспечивает улучшение усреднения ее смеси с концентратом. Подача возврата и отсева агломерата доменного цеха в штабель повышает степень усреднения смеси в 1,4–1,8 раз. При дозировании извести и шлама в поток тонкоизмельченного концентрата происходит разусреднение смеси по основным компонентам. Минимальный запас железорудных материалов и соответственно объем штабеля должен обеспечивать работу аглоцеха в течение 5 суток, хотя понятно, что это может зависеть от удаленности поставщика и других причин.

На ряде зарубежных аглофабрик применяется комплексный метод усреднения шихтовых материалов, при котором после раздельного

формирования каждого материала производится их дозирование и формирование штабеля «моношихты». В штабель моношихты закладываются все железорудные материалы, отходы, возврат и 80% известняка, иногда топлива. Остальные 20% вводятся в шихту в основном дозировочном отделении цеха.

ПОДГОТОВКА КОМПОНЕНТОВ ШИХТЫ К СПЕКАНИЮ

По условиям теплообмена существует предельный максимальный размер кусочков компонентов шихты: для рудного материала и возврата это 6–8 мм, а для флюса и топлива — 3 мм. Частицы большего размера не успевают за 2,0–2,5 мин воздействия высоких температур прогреться и усвоиться расплавом, они остаются в виде отдельных включений в агломерате, снижая его прочность.

Подготовка твердого топлива

Увеличение на 1% содержания золы в топливе сопровождается повышением его расхода на 1,4–1,6%. Коксик и антрациты содержат 1–3% летучих, а тощие кузнецкие угли — до 15%. Увеличение на 1% содержания летучих в топливе приводит к росту его расхода на 0,6 %. Летучие топлива имеют более низкую, чем углерод, теплоту сгорания, а полнота их сжигания при агломерации составляет ~50% [2]. При содержании летучих в топливе более 15% начинается устойчивое отложение смолы в элементах газоотводящего тракта и на роторах эксгаустеров. Увеличение на 1% содержания фракции +3 мм в готовом топливе сопровождается ростом его расхода на ~0,55%.

Чем крупнее шихта, тем меньше негативное влияние крупной и большее — мелкой фракций топлива на его расход. Для грубозернистых шихт достаточным является содержание фракции 0–3 мм 90–92% в топливе, а для тонкозернистых — 95%. С увеличением содержания мелкой фракции в топливе возрастает его реакционная поверхность и уменьшается химическая полнота горения. Часть мелкой фракции закатывается в гранулы шихты и попадает в расплав. Увеличение на 1% содержания фракции < 0,5 мм в подготовленном топливе повышает его расход на ~0,35% [3].

Содержание фракции менее 0,5 мм в исходном топливе достигает 40%. Единственным способом уменьшения ее содержания в подготовленном топливе является отсев фракции менее 3 мм перед дроблением топлива. На аглофабриках СНГ эта операция, как правило, не производится, или выполняется на грохотах с низкой эффективностью.

Грохоты. Компания «Вибротехцентр-КТ» провела анализ работы традиционных грохотов. В нем отмечается: «… в любом традиционном вибрационном грохоте для возбуждения сетки необходимо возбуждать весь корпус машины, поскольку сетка жёстко закреплена на корпусе. Поэтому высокие ускорения, помноженные на большую массу всего грохота, дадут в результате такую силу, что конструкция самого грохота попросту не выдержит динамических нагрузок и развалится. Соответственно вибрационные грохота работаю в основном в пределах ускорений 4–5 g, где g — ускорение свободного падения. Современные вибрационные грохота дошли до предела увеличения массы. Эти проблемы неразрешимы при традиционном подходе… Ни один традиционный грохот не просеивает материал, а только лишь перемещает его по поверхности сетки.

За рубежом для решения этих задач используется, в частности, немецкий грохот «Flip-Flow/Flop» (прыгающий поток). У него очень большая величина ускорения гибкой полиуретановой панели с перфорированными отверстиями (достигающая 50 g), обеспечиваемая принципом его работы (рис. 1).

Она позволяет достичь высокой удельной производительности при грохочении влажных (табл. 1) и даже содержащих глину материалов.

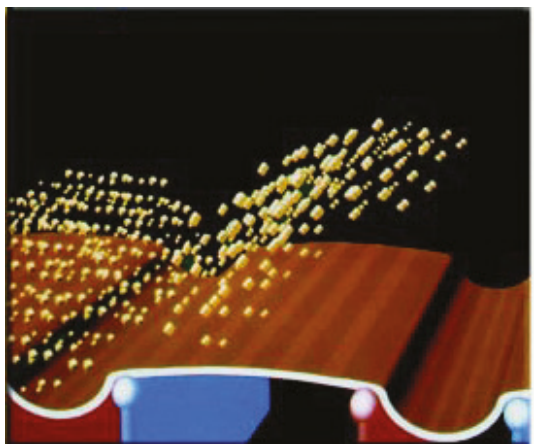


Рис. 1. Принцип действия грохота «Flip-Flow»

Таблица 1. Примеры применения грохота «Flip–Flow» в горнодобывающей и металлургической промышленности

Страна — клиент	Площадь сита, м^2	Ячейка сита, мм	Материал и его влажность, %	Нагрузка, т /ч
Испания	6,0	3–4	бурый уголь, 3–8	60–70
Германия	19,4	1	уголь. мелочь, 6–7	250
Франция	8,2	5	уголь, 8–11	50
Германия	17,6	5	рядовой бурый уголь, 60	200
Австрия	6,3	3	кокс, 12–19	30
Франция	10,1	4	кокс, 20	60
Голландия	17,6	3–6	нефтяной кокс, 8–12	100
Испания	19,4	3	коксовая мелочь, 15–20	80
Австрия	8,2	8	различные руды и окатыши, 3–5	250
Германия	3,8	1	сухая угольная мелочь	50
Испания	8,2	3	кокс, 11	50

Применение в качестве рабочих органов эластичных полиуретановых матов с высокими абразивными и антикоррозионными свойствами обеспечивает значительно более длительную кампанию по сравнению с металлическими ситами. У грохота линейное возвратно-поступательное разнонаправленное движение двух рам грохота преобразуется в движение индивидуальных секций, подобное движению тел на батуте.

Результаты испытаний на аглофабрике метзавода в г. Бокаро (Индия) по оценке эффективности работы грохота «Flip-Flow» по отсеву коксовой мелочи влажностью 6% перед дроблением кокса приведены в работе [5]. Отделение дробления топлива обслуживает три агломашины типа АКМ-312. Перед испытаниями грохот при нагрузке 90 т/ч проработал 5,5 месяцев без замены полиуретанового полотна(при 3-х проектных), что привело к некоторому износу последнего. Несмотря на это, эффективность работы грохота, оказалась равной 79,2% при проектной точности отсева 90%. Выход подрешетного продукта составил 33,2 т/ч, что равно производительности двух четырехвалковых дробилок.

Дробилки. Ни молотковые, ни стержневые мельницы не соответствуют требованиям агломерационного процесса, как по гранулометрическому составу дроблёного топлива, так и по стабильности его характеристик. По оценке работы [4] степень использования топлива в процессе спекания для четырехвалковой дробилки составляет ~86%, а для стержневой, даже с предварительным отсевом мелочи — 83%.

Таблица 2. Сравнение четырехвалковых дробилок Д41 980 1000 и «SKET»

Характеристики	Дробилка Д41 980×1000	Дробилка VWM 0612 M
Длина валка, м	1,00	1,20
Диаметр валка, м	0,95в/0,98н	0,65
Частота вращения нижних валков, мин$^{-1}$	116в/180н	206
Окружная скорость нижних валков, м/с	9,23	7,01
Производительность, т/ч	30	30
Установленная мощность, кВт	60	44
Удельный расход электроэнергии, кВт*ч/т топлива	3,75	2,06
Масса дробилки, т	27–34	20,2

На аглофабрике «АрсеорМиттал Темиртау» установлена четырехвалковая дробилка «МК ОРМЕТО-ЮУМЗ» типа Д41 980×1000 проектной производительностью 30 т/ч. Однако заявленная производительность дробилки не подтверждена практикой.

На аглофабрике ЧМК установлены три четырехвалковые дробилки типа «SKET» (Германия) для дробления топлива. Сравнительная характеристика дробилок отечественного производства типа Д41 980×1000 и «SKET» приведена в табл. 2. Кроме указанных преимуществ дробилки»SKET», у нее в 1,5–2 раза ниже уровень шума.

Подготовка известняка и извести

Максимальный размер частичек *известняка* (доломита) в агломерационной шихте не должен превышать 3 мм. В этом случае происходит полная диссоциация $CaCO_3$ и усвоение образующегося CaO расплавом.

Наилучшими агрегатами для обжига известняка для агломерационного производства являются шахтные и вращающиеся печи, работающие на природном газе.

Для грохочения известняков после дробления на аглофабриках применяются традиционные вибрационные грохоты. Грохот «Flip-Flow», безусловно, может быть применен и для грохочения известняка.

ПОДГОТОВКА ШИХТЫ К СПЕКАНИЮ

Смешивание агломерационной шихты

Наряду с процессом равномерного распределения одних частиц в объеме других, при смешивании сыпучего материала идет обратный процесс — разусреднение смеси. Поэтому при любом времени обработки невозможно получить абсолютно однородную смесь.

Согласно работе В.И. Коротича [6] «Для смешивания сыпучих материалов наилучшим является водопадный режим». Согласно работе [1] для смешивания и для окомкования шихты наиболее благоприятен режим переката. Практически при наличии гарнисажа в барабане-смесителе реализуется смешанный режим, преимущественно перекатный.

Наилучшие результаты по качеству смешивания шихты достигаются при ее влажности 4–5%. При меньшей или большей влажности материала степень однородности оказывается ниже [6]. Лабораторный данные Д.Г. Хохлова и Г.И. Коморникова [7] по влиянию влажности качканарского концентрата на эффективность смешивания, иллюстрируются рис. 2 и полностью согласуются с выводами работы [6].

Рис. 2. Зависимость эффективности смешивания агломерационной шихты по распределению в ней углерода от влажности концентрата

Данные об изменения степени однородности агломерационной шихты до и после смешивания приведены в табл. 3.

Таблица 3. Степень однородности агломерационной шихты до и после смешивания на Лебяжинской аглофабрики [3]

Место отбора проб	По углероду			По CaO		
	C	ΔC	K_o	C	ΔC	K_o
До смесителя	4,55	1,14	60,0	8,06	1,72	64,8
После смесителя	4,02	0,43	80,6	7,99	0,69	84,2
После окомкователя	3,90	0,41	80,9	7,61	0,66	83,9

Коэффициент однородности в барабанах-смесителях возрастает от ~ 60% в усредненной шихте до 80–85%, а в барабанах-окомкователях он практически не изменяется.

Окомкование агломерационной шихты

На эффективность окомкования шихты влияют ее гранулометрический и химический составы, режим увлажнения, связующие добавки, конструктивные характеристики и режимы работы барабанов-окомкователей.

Основными зародышевыми центрами для окомковании шихты служит возврат. Согласно [6] для этого наиболее эффективно использовать мелкий возврат: «При замене крупного возврата (5–12 мм) мелким (1–3 мм) значительно увеличилось число центров окомкования, коэффициент грануляции увеличился в 4 раза». В опытах с череповецкой шихтой с 20% возврата крупностью 1–3 мм шихта после окомкования обладала более высокой газопроницаемостью, чем та же шихта с возвратом крупностью 5–12 мм.

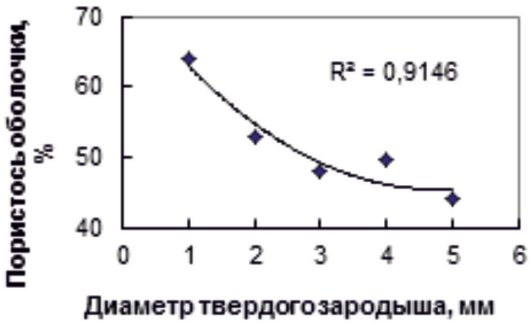


Рис. 3. Влияние диаметра твердого зародыша на пористость оболочки гранулы

Вместе с тем необходимо учитывать влияние крупности комкуемых материалов на прочность гранул. На рис. 3 представлены данные работы [1] по влиянию крупности (массы) твердого зародыша на величину пористости оболочки гранулы.

Как видно из рисунка, для прочности гранул необходимо наличие в шихте возврата фракции 3–5 мм.

Согласно исследованиям А. Маслянка, В. Сабела горячий возврат в качестве зародышевых центров уступает холодному возврату [8]. Наиболее полное использование возврата в качестве центров образования гранул обеспечивается при применении охлажденного возврата фракции < 6 мм в количестве не менее 25%.

На современных зарубежных аглофабриках, использующих хорошо окомкованную шихту с известью, достигнут выход возврата в количестве от 180–120 и даже 90 кг/т агломерата [9, 10].

Зародышевыми центрами также служат руда и капли воды для концентратов при капельном распылении последней. Однако прочность гранул на основе возврата существенно выше, чем на основе руды и «мягких» зародышевых центров.

Важную роль в окомковании играет и наличие в железорудной части глинистой пустой породы, существенно улучшающей грануляцию шихты.

Увлажнение шихты

Вода в слое шихты выполняет роль клеящей жидкой фазы, обеспечивая взаимное сцепление минеральных частичек в комочке. Основным типом сил, обусловливающим прочность влажного комочка, являются капиллярные силы [6].

Оптимальная влажность шихты соответствует не минимуму насыпной массы (γ) или максимуму начальной газопроницаемости слоя w, а максимальной скорости процесса спекания $U_{сп}$ (рис. 4).

Абсолютное значение оптимальной влажности агломерационных шихт определяется в первую очередь величиной удельной поверхности железорудных материалов (S, см^2/г). Она имеет следующие значения для шихт [6]:

- на основе зернистых руд (S менее 500), — 5,5–6,0%;
- на основе грубозернистых концентратов (S = 500–1000) — 6,0–7,0%;
- на основе тонкоизмельченных концентратов (S = 1500–2000) — 8,0–8,5%;

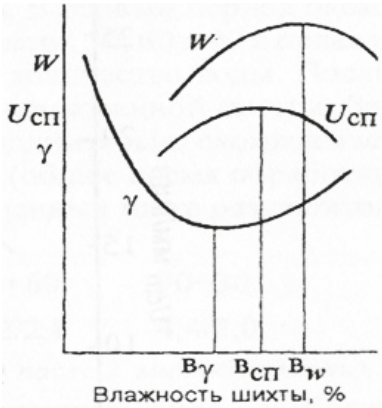


Рис. 4. Влияние влажности шихты на ее насыпную массу γ, скорость фильтрации воздуха через слой w и вертикальную скорость спекания $U_{сп}$

- на основе бурожелезняковых рудных материалов (S более 6000) — 10–12%.

Существенную роль при окомковании шихты играет интенсивность подачи воды в окомкователе. Наилучшим соотношением между временем подачи воды по длине барабана-окомкователя и временем без ее подачи является 3:1 [11].

Согласно [12] при существующей несовершенной технологии окомкования шихты единственно возможным является капельный режим увлажнения. При тонком распыле зародыши гранул, формирующиеся из тонкоизмельченного материала, являются пористыми и непрочными, что приводит к образованию механически неустойчивых к внешним нагрузкам гранул. В опытах Г.И. Серебряника [13] установлено, что оптимальным является диаметр струи 6 мм, обеспечивающий капельное распыление воды.

Способ накатывания топлива на гранулы, как отдельное направление, вне применения двухслойной загрузки шихты на агломашину, на взгляд автора, бесперспективно.

Согласно [6] «… процесс окомкования сыпучих материалов складывается из трех последовательных стадий: образование центров — зародышей окомкования; рост комков и массообмен между образовавшимися гранулами». Тем самым прочность гранул рассматривается не как самоценное свойство, определяющее поведение шихты в процессе спекания, а как свойство, связанное только со способностью к окомкованию ... Технология окомкования в работе [12] определяется как задача получения прочных гранул и сформированного из окомкованной шихты агломерата.

Интересно отметить, что самая высокая удельная производительность агломашин в странах СНГ — 2,07 т/(м^2×ч) и, вероятно в мире, достигнута на аглофабрике Запорожстали, где и смешивание и окомкование осуществляется в одном барабанном аппарате 2,8×8 м. Это иллюстрирует соотношение роли свойств материала и способов его окомкования.

Применение извести и известкового молока для окомкования шихты

Единственной добавкой, доказавшей свою технологическую и экономическую эффективность для окомкования агломерационных шихт, оказалась обожженная известь. Одни из первых опытов по применению извести были проведены уральскими учеными А.П. Квасковым и др. в 30-е годы прошлого столетия. В журнале «Уральская металлургия» они пишут: «добавки от 3 до 5% гашеной извести в виде пушонки или известкового молока при агломерации 50 кг шихты в опытной чаше сопровождались повышением производительности спекания по шихте на 63–78%, а по годному агломерату на 70–116%». Высокую эффективность применения обожженной извести при агломерации мелких железных руд подтвердили в 1943 г. немецкие исследователи [14]. Инициатором широкого промышленного применения обожженной извести в агломерационном производстве в целях его интенсификации стал в 50-е годы прошлого столетия Н.З. Плоткин.

Теоретические и прикладные вопросы ввода извести в агломерационную шихту детально рассмотрены в работе [12]. В частности, в ней отмечается: «Значительный опыт в этой области накоплен на аглофабриках Украины, первыми в мире широко применившими известь... Однако этот опыт выявил и отрицательные моменты, связанные с использованием неэффективных обжиговых машин карусельного типа, низким качеством извести… К негативным последствиям относятся резкое повышение колеблемости агломерата по выходу мелочи 0–5 мм, по массовой доле железа и основности, существенное ухудшение экологической обстановки при высоком (до 100 кг/т) расходе извести. Следствием этого стало повышение приведенного расхода кокса в среднем по доменным печам Украины на 40 кг/т чугуна».

О рациональном расходе извести

Интенсифицирующее действие извести зависит от уровня ее содержания в шихте, превышение которого не дает увеличения производительности агломашины. Уменьшение производительности объясняется переокомкованием и уменьшением насыпной массы шихты. Эффективность использования и рациональный расход негашеной извести, подаваемой в шихту, определяется долей тонкоизмельченных концентратов и шламов в железорудной части шихты, массовой долей активного CaO в извести, массовой долей усвоенной шихтой извести (погашенной и прошедшей стадию диспергирования) [12].

С увеличением содержания доли концентратов в шихте удельный расход извести, соответствующий наибольшей производительности агломашин, возрастает. Установлено [15], что при расходе извести до 4% прирост производительности в среднем составляет 4–6% на 1% извести. При оптимальном расходе извести в шихту основной показатель качества агломерата — выход класса < 5 мм после испытаний растет на 6,1–6,8%. Возможная экономия твердого топлива составляет около 10% (отн.).

В исследованиях [16] Г.В. Коршикова с коллегами результаты аналогичны — прирост производительности достигал максимума при содержании извести 3,5–6%, а затем производительность снижалась.

О рациональной крупности агломерационной извести

Данные о влиянии начальной крупности извести на показатели агломерационного процесса и качественные характеристики агломерата свидетельствуют об их прогрессивном улучшении при уменьшении крупности извести. Лабораторные опыты показали возможность прогрессивного самоизмельчения извести за счет воды концентрата после достижения начальной крупности ее частиц 1,5–2,0 мм [12].

О способе ввода извести в шихту

При подаче извести в поток влажного концентрата, поступающего на усреднительный склад, смесь должна подвергаться предварительному смешиванию в барабанном смесителе. В этом случае после вылеживания достигаются наилучшие результаты.

Из данных рис. 5 [12], на котором показано изменение прочности гранул, полученных из смеси железорудного концентрата Ингулецкого ГОКа с известью (5%), следует, что величина статической прочности известкованных влажных и высушенных гранул после вылеживания в течение 5 суток достигает практически максимального значения, увеличиваясь соответственно от 151 до 274 и от 318 до 420 г/гран, то есть в 1,81 и 1,32 раза.

Если проблема смерзаемости шихтовых материалов на складе в регионе отсутствует, а известь представлена только мелкой фракцией, то всю ее целесообразно подавать в шихту в дозировочном отделении, т.к. это позволяет подогреть шихту.

Если шихта подогревается горячим возвратом, а привозная известь представлена крупными фракциями, то ее следует вводить в поток поступающего концентрата, смешивать их, добавляя воду и подавать на усреднительный склад.

Если же шихта подогревается газом или паром в барабанах-окомкователях, то известь целесообразно преимущественно подавать на усреднительный склад, а частично — непосредственно в шихту, чтобы сократить расход газа или пара на ее подогрев.

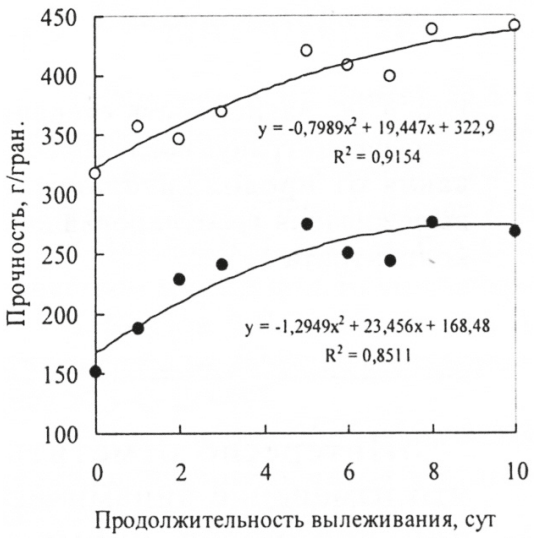


Рис. 5. Зависимость механической прочности известкованных сырых (•) и сухих (о) гранул от продолжительности вылеживания извести с водой и концентратом и ее гашение

Ввод в шихту известкового молока

Известь является медленно твердеющим вяжущим веществом. При введении известкового молока в агломерационную шихту ее твердение происходит очень быстро.

Представительные промышленные опыты по подаче в шихту известкового молока провели на аглофабрике

Рис. 6. Шихта, окомкованная с вводом известкового молока

ЧМК [17]. Расход молока в переводе на сухую известь составил 11 кг/т агломерата. Шихта, окомкованная с добавления известкового молока, показана на рис. 6.

В период испытаний (20 ч) прочность агломерата по барабанной пробе по классу +5 мм возросла на 1,0–1,5%, массовая доля фракции 0-5 мм в агломерате снизилась на 3% (абс.), заметно улучшилась работа доменных печей.

Согласно результатам лабораторных исследований[1], при вводе известкового молока в шихту качканарской аглофабрики в количестве 30 кг/т (в пересчете на сухую известь), достигнуто увеличение скорости спекания с 13 до 23,5 мм/мин, а сухой извести в таком же количестве — до 18,5 мм/мин.

Оптимизация режима работы и конструктивных характеристик барабанов-смесителей и окомкователей

Для эффективного окомкования шихты, грануляция которой практически завершается на первых 2/3 барабана-окомкователя (данные Г.В. Коршикова), необходима низкая степень его заполнения, а для упрочнения гранул в последней трети барабана — повышенная. В гладком барабане распределение шихты диаметрально противоположное и совместить в нем требования к грануляции шихты и упрочнению гранул невозможно. Принципиально меняет распределение шихты по длине барабана при одновременном увеличении времени пребывания шихты установка в них конусной вставки [17]. Она позволяет существенно повысить эффективность окомкования шихты, улучшить показатели процесса спекания. Эффективность установки подпорного кольца на 40% ниже. Для расчета размеров вставок, степени заполнения барабанов, массы и времени пребывания в них шихты разработана математическая модель.

Модернизация в 2009–2010 гг. барабанов-окомкователей аглоцеха № 2 ЧМК с уменьшением угла их наклона с 1,7 до 0,8 град. установкой конусных вставок с позволила увеличить высоту слоя шихты с 430–460 до 550 мм, снизить содержание фракции 0–5 мм в скиповом агломерате на 1,5% (абс.), удельный расход твердого топлива — на 1,5 кг/т, электроэнергии — на 4,2 кВт/т, содержание FeO в агломерате — на 0,5% (абс.). Производительность агломашин выросла на 6% [17].

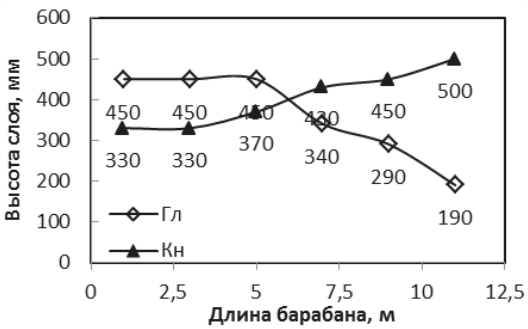


Рис. 7. Распределение высоты слоя шихты по длине барабана-окомкователя ОБ 3,2×12,5

Результаты измерений высоты слоя шихты по оси барабана-окомкователя до и после установки конусной вставки на агломашине АКМ-312/336 «АрселорМиттал» показаны на рис. 7. Благодаря вставке реализовано рациональное распределение шихты по длине барабана-окомкователя: степень заполнения шихтой изменяется по длине барабана от 5,7 до 10,2%.

При реконструкции агломашины АМ-7 вставки установили в барабан-смеситель и оба барабана-окомкователя.

Установка конусных вставок в барабан-смеситель и барабаны-окомкователи АМ-7 позволила увеличить на 1% (абс.) влажность шихты, частоту вращения барабанов-окомкователей (на 1 об/мин) и, одновременно, время ее пребывания (на 27,5%), а также поднять на 70 мм высоту слоя шихты на агломашине. Что касается эффекта по удельной производительности АМ-7, которая после реконструкции выросла на 40%, то выделить долю влияния модернизации барабанов не представилось возможным.

Анализ производственных данных и исследования на математической модели позволили сделать ряд обобщающих выводов по работе барабанов-окомкователей.

Так, увеличение/уменьшение отношения степени заполнения барабана шихтой при уменьшении/увеличении отношения угла его наклона и частоты вращения сопровождается равным увеличением/уменьшением отношения времени пребывания шихты в барабане.

Увеличение угла наклона барабана на 1 град. сопровождается уменьшением времени пребывания на 35–50% для барабанов диаметром 3,8–4,2 м и на 23–33% — для барабанов диаметром 2,8–3,2 м. Чем больше частота вращения барабана, тем сильнее этот эффект.

[1] Опыты выполнены к.т.н. В.А. Кобелевым в Уральском институте металлов

Увеличение частоты вращения барабана сопровождается гораздо меньшим сокращением времени пребывания — от 5 до 11% за 1 об/мин.

С увеличением угла наклона барабана влияние конусной вставки на время пребывания шихты (как и на степень заполнения барабана) уменьшается. Поэтому выходной диаметр вставки по мере увеличения угла наклона следует дополнительно уменьшать.

Чем меньше выходной диаметр конусной вставки в барабане и, соответственно, больше степень его заполнения, тем меньше влияние частоты вращения на продолжительность пребывания в нем шихты.

Чем больше угол наклона барабана, тем сильнее влияние увеличения частоты вращения барабана на время пребывания в нем шихты.

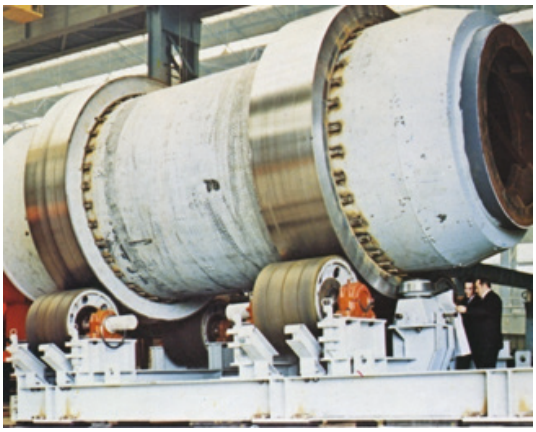


Рис. 8. Барабан-смеситель диаметром 3,1 м и длиною 8 м

С увеличением расхода шихты влияние конусной вставки на степень заполнения барабана и продолжительность пребывания в нем шихты уменьшается, поэтому при прочих равных условиях выходной диаметр вставки необходимо увеличивать.

Угол наклона длинного барабана должен быть больше, а выходной диаметр конусной вставки меньше, чем у короткого барабана.

Частота вращения барабана меньшего диаметра должна быть больше, чем барабана большего диаметра.

Эффективно сочетать уменьшение угла наклона барабана с увеличением частоты его вращения.

На рис. 8 в качестве примера рациональной конструкции показан барабан-смеситель с фрикционным приводом внутренним диаметром 3,1 м и длиною 8 м аглофабрики Коккериль (Бельгия). Диаметр барабана сужается в разгрузочной части. Покрытие катков — полиуретановое.

О рациональном месте установки барабанов-окомкователей

Барабаны окомкователи ОБ 3,2×12,5, устанавливаемые в корпусе спекания над агломашинами площадью спекания 220 и 312 м^2, работают при частоте вращения 3,5–5,0 мин$^{-1}$, что обусловлено вибрацией строительных конструкций здания. Это характерно и для работы барабанов длиною 8 м на старых аглофабриках, и является одной из причин низкого качества окомкования шихты.

При строительстве зарубежных аглофабрик их стали устанавливать на нулевой отметке, что позволяет аппаратам работать в оптимальном режиме. Это обеспечивает и дополнительные преимущества: снижение высоты корпуса спекания, отсутствие шихтовых бункеров и дозирующих средств в корпусе, снижение высоты и длины галереи из шихтового в спекательное отделение, и, как результат, сокращение капитальных затрат. Также создается возможность оперативной корректировки расхода твердого топлива. Рациональным вариантом компоновки оборудования при этом является непосредственная передача шихты из смесителя меньшего диаметра с конусным сужением в торце в окомкователь большего диаметра.

Новые аппараты для смешивания и окомкования шихты

Интенсивные смесители немецкой фирмы Айрих применяются на аглофабриках Японии, Бразилии, Индии, Китая и Тайваня и некоторых других стран, причем, не только для смешивания, но и для окомкования шихты и отходов металлургического производства [18–22]. По данным В.С. Смирнова [23] максимальная удельная энергия, переданная от вращающегося барабана единичной грануле, составляет (3,9–6,1)×10^{-3} Дж, что в 4–8 раз меньше, чем удельная энергия, приобретаемая окатышем в тарельчатом грануляторе. В интенсивных смесителях она превышает последнюю в 10–12 раз. Принцип их ействия показан на рис. 9.

Эти смесители смешивают шихту степенью однородности до 95% и равномерно распределяют в ней всю воду, а также формируют микрогранулы, в том числе и без твердых зародышевых центров.

Разработчики интенсивных смесителей рекламируют, в частности, следующие технологические преимущества аппарата: не нужно предварительное усреднение, достигается малый удельный расход электроэнергии на 1 т обрабатываемого материала, уменьшается расход твердого топлива благодаря его наилучшему распределению.

Первое утверждение глубоко ошибочно. Возможно, имеется в виду операция формирования склада моношихты, что можно признать допустимым. Удельный расход электроэнергии интенсивного смесителя почти в 3 раза выше, чем у аппаратов барабанного типа. Рассматривая вопрос экономии топлива, следует иметь в виду, что чем равномернее шихта по грансоставу, тем хуже ее распределение по крупности и по концентрации топлива по высоте слоя. Так, в работе [24] отмечается, что при установке интенсивного смесителя пришлось переизмельчать топливо для улучшения его распределения по высоте слоя.

Рис. 9. Принцип действия интенсивного смесителя

Интенсивный смеситель оборудован большим числом приводов (до 6 ед.) и сложен в обслуживании. Требуется защита керамической футеровки и клапана разгрузочного устройства от попадания посторонних предметов, высокая точность дозирования для синхронизации работы загрузочного и разгрузочного элементов аппарата.

Учитывая условия работы аглофабрик СНГ, интенсивный смеситель наиболее рационально использовать только для грануляции пылей и отходов металлургического производства. Такое техничесое решение успешно реализовано на аглофабрике завода «Запорожсталь».

Аналогичный вывод можно сделать и в отношении смесителя типа «Ледиге».

ПОДОГРЕВ ШИХТЫ ПЕРЕД СПЕКАНИЕМ

Подогрев до 60 °С шихт на основе тонкоизмельченных концентратов горячим возвратом предложил В.В. Виноградов [25]. Такой подогрев позволяет увеличить скорость процесса спекания до 40%.

Авторы работы [12] считают, что при использовании извести следует снижать температуру подогрева шихты паром на 20 град. для улучшения ее окомкования. Эта рекомендация не подтверждается практикой. Так, на аглофабрике ЧМК в шихту подается 40 кг извести /т агл., а оптимальная температура подогрева шихты паром составляет 56 °С [17].

Французскими исследователями в работе [26] получено, что влияние подогрева шихты паром «заметно при температуре выше 50 °С».

При переводе агломашин Коммунарского метзавода с подогрева шихты горячим возвратом на подогрев паром Пузанов В.П., Мищенко И.М установлено, что произошло увеличение оптимальной влажности шихты и уменьшение выхода возврата [27, 28]. Однако, несмотря на это и дополнительный ввод извести, сопротивление слоя несколько возросло, а удельная производительность агломашин снизилась. Эффективность подогрева шихты возвратом оказалась выше, чем паром.

ЗАГРУЗКА ШИХТЫ И ПОСТЕЛИ НА АГЛОМЕРАЦИОННУЮ МАШИНУ

Ряд важных требований к операции загрузки шихты, таких как обязательное применение защитной постели, укладка слоя шихты на аглоленту с минимальной объемной плотностью, распределение горючего углерода в пользу верхних слоев, сформулирован С.М. Мееровым еще в 30-х годах прошлого столетия [29].

Укладка постели на агломашину

На большинстве аглофабрик стран СНГ выделяется «естественная постель» за счет сегрегации шихты по крупности при ее загрузке на аглоленту. При этом через колосниковую решетку выносится до 4% шихты от производимого агломерата. На агломашине АКМ-312 ЧерМК проведены опыты по оценке влияния постели на запыленность отходящих газов [30]. Постель из агломерата фракции 8–12 мм с высотою слоя 30 мм обеспечила снижение запыленности газов после батарейных циклонов в 2,5 раза

Для анализа тепловой работы постели, в паллетах агломашины Коммунарского метзавода площадью спекания и охлаждения по 90 м^2, выполнены измерения температурных полей и проведен анализ на комплексной математической модели ВНИИМТ [31]. Расчеты показали, что при отсутствии постели и высоте слоя шихты 450 мм максимальная температура колосников в зоне спекания шихты достигает 690 °С, а в зоне охлаждения спека — 860 °С. При укладке слоя постели высотой 30 мм температура колосников снижается до 420 °С в зоне спекания и до 790 °С — в зоне охлаждения.

Формирование слоя шихты в загрузочной воронке

Работа узла загрузки шихты должна обеспечивать:

- одновременный по ширине аглоленты подход зоны горения топлива к нижней границе слоя;
- распределение гранулометрического состава шихты и, как следствие, топлива по высоте слоя, при котором максимально компенсируется дефицит тепла в верхней части слоя и избыток тепла — в нижней;
- получение минимальной по абсолютной величине и близкой по высоте слоя объемной плотности слоя шихты;
- стабильность во времени перечисленных характеристик.

Известно [32–36 и др.], что скорость спекания шихты на периферии слоя выше, чем в его центральной части. Потери производительности по этой причине достигают 8–10%.

Характерное распределение шихты в загрузочной воронке (далее ЗВ) шириною 4,4 м агломашины АКМ-312 НЛМК, измеряемое радарным датчиком, установленном на тележке челнокового распределителя шихты (далее ЧРШ), показано на рис. 10 [37].

Как видно, высота слоя шихты ниже у боковых стенок ЗВ, чем в ее центральной части. Такое распределение шихты обусловливает ее неравномерное распределение с сегрегацией крупной части шихты к краям ЗВ, неупорядоченную высоту слоев по ее ширине (рис. 11) и, как следствие, неравномерное спекание по ширине агломашины.

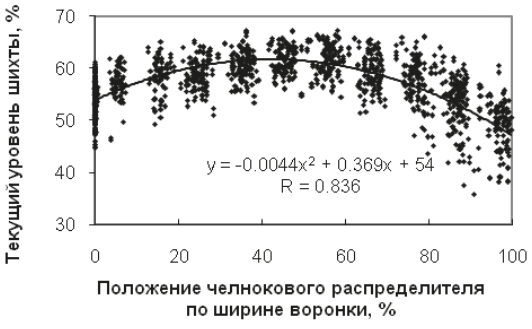


Рис. 10. Типичное распределение шихты в загрузочной воронке

Рис. 11. Типичный профиль слоев в загрузочной воронке

Анализ на математической модели [38] показал, что рациональным является режим работы ЧРШ, при котором в дополнение к постоянству скорости конвейерной ленты ЧРШ относительно течки с барабана-окомкователя, соблюдается условие, учитывающее накопление на ленте шихты в крайнем от течки положении (рис. 12). В этом режиме лента и тележка ЧРШ движутся вперед с меньшей скоростью, а назад — с большей.

Чем тоньше слои шихты в ЗВ и чем больше частота вращения барабанного питателя (меньше высота разгрузочного отверстия), тем меньше неоднородность слоя и неравномерность распределения шихты по высоте слоя на агломашине по крупности и объемной плотности. Однако «идеально» распределить шихту с помощью ЧРШ у краев ЗВ и, как следствие, бортов паллет, невозможно. Можно сделать это в центральной части ЗВ и уменьшить ширину участков с крупной шихтой у бортов паллет, увеличивая продолжительность выдержки ЧРШ у боковых стенок ЗВ, но нельзя устранить цикличность укладки крупной и мелкой шихты.

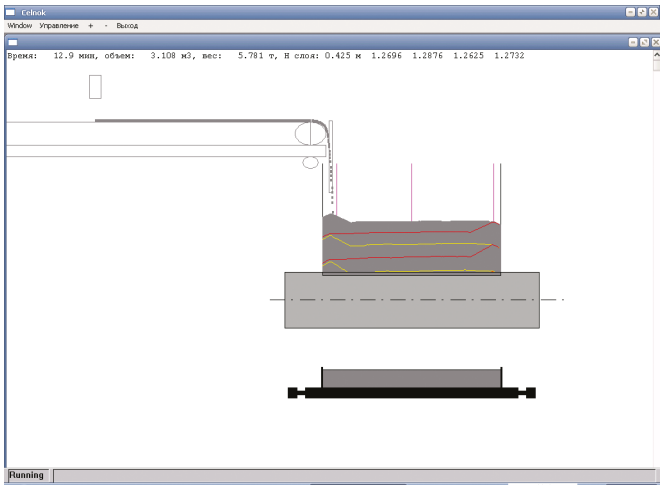


Рис. 12. Оптимальное распределение шихты в загрузочной воронке

Режим формирования слоя шихты в ЗВ улучшает и упрощает перпендикулярная установка ЧРШ относительно воронки, как это, например, выполнено на агломашине метзавода Dragon Steel, Тайвань. В этом случае отсутствует чередование толстых и тонких слоев на ленте ЧРШ и в ЗВ, а управление ЧРШ сводится к одинаковой по времени выдержке его остановок.

Формирование слоя шихты на агломерационной машине

Одним из эффективных способов устранения неравномерности процесса спекания по ширине агломашины является формирование слоя шихты с плавно увеличивающейся высотою к бортам паллет. Об эффективности такого увеличения высоты слоя свидетельствуют результаты установки на агломашинах аглофабрики № 2 Бхилайского метзавода (Индия) наклонного лотка с плавным уменьшением его высоты к бортам паллет [39]. Расход шихты на агломашины увеличился с 145 до 160–165 т/ч, а годовое производство агломерата на аглофабрике выросло на 6,7%.

Весьма эффективной оказалась установка прибортовых плит вместо колосников в прибортовой зоне паллет, осуществленная фирмой VAI на аглофабрике Korus Porus, Port Talbort, UK. Паллеты агломашины уширены от 4,00 до 4,55 м с установкой плит шириной по 275 мм при неизменной ширине колосникового поля и вакуум-камер. При увеличении площади спекания агломашины на 16% ее производительность выросла на 21,8%, удельная производительность — с 1,460 до 1,525 т/(м^2×ч), расход электроэнергии снизился на 2 кВт*ч/т агломерата. Замена нагнетателей при этом не производилась, т.е. общий расход воздуха через слой и, соответственно, отходящих газов практически не изменился.

Однако эти данные получены после капитального ремонта агломашины, т.е. эффект достигнут и за счет рутинных мероприятий при таких ремонтах.

Аналогичные технические решения внедрены на других зарубежных аглофабрик.

Используя этот опыт, на агломашинах ОАО «ЧМК» установили плиты шириною по 150 мм, но без расширения паллет [40]. В результате разрежение в зоне спекания возросло на 0,6 кПа, что соответствует 2% увеличения производительности агломашины, а температура отходящих газов в зоне охлаждения выросла на 30 °С.

Распределение грансостава шихты и содержания топлива по высоте слоя

Значительное влияние на качество агломерата и производительность агломашин оказывает распределение шихты по крупности по высоте слоя.

Спекание в агломерационной чаше грубозернистой шихты ОХМК с воспроизведением ее сегрегации по крупности на агломашине, сопровождалась увеличением газопроницаемости слоя исходной шихты и ускорением процесса спекания на 15% по сравнению с его равномерным распределением [41]. Замена барабанного питателя шихты вибропитателем [42] на заводе «Запорожсталь» позволила существенно повысить уровень сегрегации шихты и топлива и газопроницаемость слоя исходной шихты,

что позволило увеличить высоту слоя с 290 до 390 мм при снижении скорости спекания всего на 6,4%. Производительность агломашин не изменилась за счет увеличения выхода годного агломерата.

Рассчитанная на математической модели экономия топлива за счет оптимизации распределения углерода по высоте слоя составляет от 2,2 до 6,2% для слоя от 220 до 550 мм соответственно.

В индийском научно-исследовательском центре на установке, моделирующей промышленное загрузочное устройство, проведены опыты для оценки влияния длины и угла наклона загрузочного лотка на сегрегацию шихты [43]. Установлено, что при длине лотка 1200 мм степень сегрегации шихты не зависит от угла его наклона (в пределах от 45 до 60 град.). Поэтому для данной шихты минимальная длина лотка должна быть 1200 мм. При коротком лотке, который не может выполнить свою функцию по разделению шихты по крупности, его следует устанавливать под большим углом, а при установке длинного лотка — под меньшим.

На аглофабрике № 1 Бхилайского метзавода в Индии барабанный питатель подняли на 500 мм, что позволило увеличить рабочую длину лотка с 650 до 1260 мм. «Индекс сегрегации» (соотношение содержания фракции 0–3 мм в верхнем и нижнем слоях) вырос с 1,2 до 2,0, а разница в содержании топлива в шихте вверху и внизу слоя (элементарные слои по 30 мм) — от 1,3 до 3,7%. Разница в величине холодной прочности агломерата вверху и внизу слоя сократилась с 10,8 до 1,3% абс., выход годного агломерата вырос на 2%, а скорость процесса спекания не изменилась [43].

Двухслойная загрузка шихты

Чем меньше эквивалентный диаметр и чем менее полидисперсная шихта, тем хуже она разделяется по крупности. Поэтому оптимизировать распределение топлива по высоте слоя для тонкозернистых шихт за счет его сегрегации невозможно. Загрузка в два слоя с повышенным содержанием углерода в верхнем слое в этом случае является единственным способом.

Интересно, что вначале она появилась в результате того, что не удалось разработать ЧРШ необходимой производительности для мощных агломашин. На аглофабриках России двухслойная загрузка применяется только на агломашинах АКМ-312 ЗСМК.

Распределение углерода топлива по высоте двухслойной агломерационной шихты ЗСМК показано на рис. 13.

Такое распределение топлива можно считать оптимальным. Важным достоинством двухслойного спекания является и то, что топливо в верхнем слое можно оперативно изменять с минимальным временем запаздывания. Для шихт на основе тонких концентратов двухслойная загрузка шихты остается эффективным способом производства агломерата.

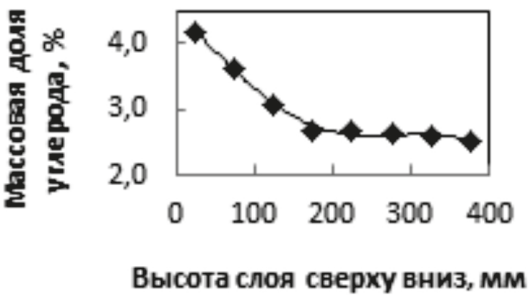


Рис. 13. Распределение углерода по высоте двухслойной шихты агломашины ЗСМК

Объемная плотность слоя шихты

Пониженную прочность агломерата верхнего слоя на агломашине обычно связывают с дефицитом тепла в этой части слоя. Это справедливо лишь частично. Важнейшая физико-механическая характеристика, связывающая скорость спекания и прочность спека, — объемная плотность шихты.

Так, по данным [41] объемная плотность грубозернистой шихты ОХМК увеличивается сверху вниз слоя высотою 240 мм от 1700 до 1900 кг/м^3. При укладке в один слой шихты НЛМК получено изменение ее объемной плотности, приведенное на рис. 14 [44].

Такая разница плотности обусловлена повышенным содержанием влаги, топлива и известняка в более мелкой

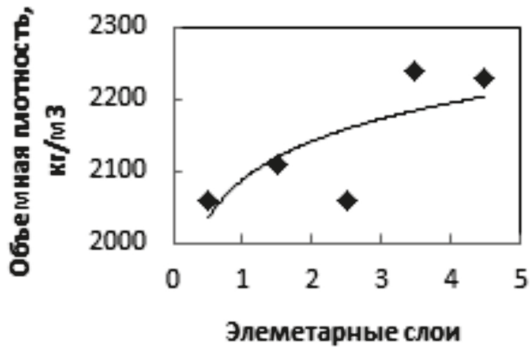


Рис. 14. Распределение объемной плотности шихты НЛМК по высоте слоя

шихте верхнего слоя, различием в величинах коэффициента внутреннего трения и угла естественного откоса, разным воздействием динамических и статистических нагрузок при укладке шихты на паллеты.

Сравнение объемной плотности слоев шихты НЛМК при двух- и однослойной загрузке шихты дало следующие результаты: слой в целом — 1955 и 1805 кг/м^3, нижний слой — 2070 и 1970 кг/м^3, верхний слой — 1840 и 1740 кг/м^3 соответственно. С общей меньшей плотностью и связано полученное увеличение скорости процесса спекания при переходе с двухслойной на однослойную укладку шихты.

Распределение объемной плотности шихты ЗСМК по высоте слоя показано на рис. 15.

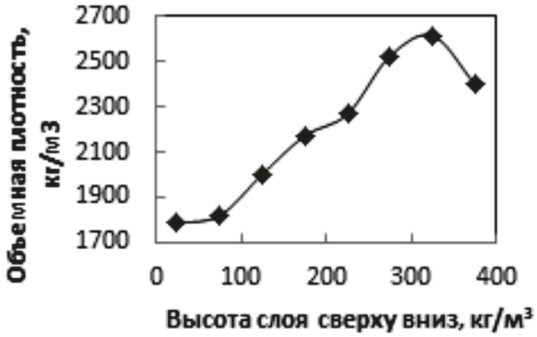


Рис. 15. Распределение объемной плотности шихты ЗСМК по высоте слоя

Как видно, абсолютная величина объемной плотности шихты и ее именение по высоте слоя очень велики. Такая большая разница в плотности шихты в определенной мере обусловлена одинаковым по высоте размещением наклонных лотков, т. е. большей высотой падения частиц шихты нижнего слоя. Некоторое снижение плотности материала в нижнем элементе слоя можно объяснить наличием в этом слое постели.

Меньшая объемная плотность верхнего слоя шихты не может не сопровождаться снижением прочности получаемого из этой части шихты агломерата, т. е. сегрегация шихты по крупности по высоте слоя оказывает и негативное влияние на процесс спекания. Отсюда возникает необходимость уплотнения верхнего слоя. На японской аглофабрике при уплотнении верхнего слоя шихты на 30 мм ниже борта паллеты достигнуто увеличение производительности агломашины с 31 до 34 т/(м^2×сут.) и выхода годного агломерата из спека с 68 до 72%, несмотря на некоторое снижение скорости спекания [45].

Стабильное распределение шихты

Стабильность структуры слоя подготовленной шихты и его физико-механических характеристик подразумевает стабильность компонентного и гранулометрического состава шихты, ее влажности, а также динамических и статических характеристик загрузочного устройства. Она достигается следующими мерами: увеличением частоты вращения барабанного питателя, установкой строго вертикально секционного шибера над выходным отверстием ЗВ, применения стабилизатора потока шихты, установки наклонного лотка с отрывом его нижней кромки от слоя шихты.

Пример комплексной модернизации узла загрузки шихты

При реконструкции узла загрузки шихты агломашин аглофабрике ЧМК внедрены следующие мероприятия [17]:

- высота ЗВ уменьшена на 500 мм, соответственно поднят барабанный питатель;
- шибер ЗВ изготовлен трехсекционным и вертикальным с исполнительными механизмами;
- загрузочный лоток удлинен на 900 мм;
- частота вращения барабанного питателя увеличена с 1,2 до 1,8 1/мин, соответственно уменьшена высота разгрузочного окна воронки;
- модернизирован СПШ — удлинен на 185 мм и выполнен зубчатым, между зубьев установили рассекатели;
- установлена секционная гладилка шихты.

В результате модернизации содержание фракции 0–5 мм в агломерате снизилось на 1,55% (абс.), расход твердого топлива — на 2 кг/т агл., электроэнергии — на 2,1 кВт*ч/т, природного газа — на 0,8 м^3/т, FeO в агломерате — на 0,4% (абс.) [17].

ВНЕШНИЙ НАГРЕВ СЛОЯ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ

Рациональная организация режима внешнего нагрева слоя шихты состоит в создании тепловых и газодинамических условий в начальном периоде агломерации для достижения высокой скорости спекания, экономичного расходования тепла и топлива на процесс и получения прочного агломерата.

Внешний нагрев слоя шихты в своем развитии прошел три этапа: «короткое» зажигание — до 60-х годов, дополнительный нагрев (комбинированный нагрев шихты) — в 60–80-е годы, и вновь «короткое» зажигание в ряде зарубежных стран. Продолжительность зажигания на первом этапе составляла 25–60 с, удельный расход тепла — 25–60 МДж/т агломерата, что, соответствует практике современного «короткого» зажигания.

Уравнение для расчета расхода тепла на зажигание шихты $q_{зж}$, имеет вид:

$$q_{зж} = 6 \times 10^4 \frac{\tau_{зж} w_{гг} T_{гг} C_{гг}}{H_{сл} \rho_ш K_г^ш (1 - q_{пт})} \text{ кДж/т агл.} \quad (1)$$

где $B_л$ — ширина ленты, м; $H_{сл}$ — высота слоя шихты, м; $\rho_ш$ — объемная плотность, кг/м^3; $K_г^ш$ — выход агломерата из шихты, кг агломерата/кг шихты; $\tau_ш$ — продолжительность зажигания, мин.

Влияние объемной плотности слоя шихты на удельный расход тепла проявляется в том, что при прочих одинаковых условиях в единицу времени может обрабатываться разное количество шихты. *Аналогично влияние выхода годного агломерата из шихты. Увеличение высоты слоя шихты* при неизменной вертикальной скорости спекания сопровождается снижением скорости ленты, а так как продолжительность внешнего нагрева слоя при этом должна быть сохранена, то соответственно уменьшаются длина горна, часовой и удельный расход газообразного топлива на зажигание шихты.

Продолжительность зажигания шихты

Еще в 30-х годах С.Г. Ростовцев с С.М. Мееровым в работе [46] и Л.Л. Ковальский [47] показали, что нагрев поверхности слоя шихты до температуры воспламенения топлива ($\tau_{заж}$) недостаточен для нормального хода процесса спекания. И что недостающее тепло должно быть восполнено увеличением времени зажигания для получения из верхней части слоя агломерата удовлетворительного качества.

С.Г. Братчиков и В.И. Тумашев работе [48] сформулировали принцип, согласно которому продолжительность зажигания должна соответствовать времени, в течение которого в слое на полную высоту формируется зона горения топлива (1,0–1,5 мин). В работах [49–57 и др.] также рекомендуется время зажигания шихты от 1,0 до 1,5 мин. Нагрев слоя сверх 1 мин условно можно рассматривать как дополнительный.

Температура горновых газов

Необходимая температура горновых газов $T_{гг}$ уравнения (1) зависит от концентрации горючего углерода в верхнем элементарном слое шихты, теплоемкости шихты и необходимой максимальной температуры нагрева материала.

Увеличивая содержание углерода в верхнем элементе слоя шихты, можно снизить температуру $T_{гг}$ и сократить расход газообразного топлива до 20%. Снижение температуры $T_{гг}$ сопровождается ростом коэффициента расхода воздуха α и концентрации кислорода в горновых газах, что улучшает условия сжигания топлива в слое. Так происходит «самонастройка» процесса совместного сжигания газа в горне и твердого топлива в слое.

Теплотехническая ценность топлива определяется как теплотой его сгорания, так и энтальпией продуктов горения газов, причем коксовый и природный газы имеют близкую величину последней, являясь в этом отношении равноценными видами топлива.

Теплотехнически и экономически рациональной для внешнего нагрева слоя является смесь доменного (65–70%) и коксового или природного (35–30%) газов [58]. Увеличение доли высококалорийного газа в смеси сверх 30–35% незначительно повышает энтальпию продуктов горения, их температуру и содержание в них кислорода, но удорожает процесс зажигания.

Температуры зажигания (топлива) шихты

Температура зажигания в горне, измеряемая термопарой, является характеристикой, зависящей от места установки датчика. Она отражает условия зажигания лишь косвенно. В процессе зажигания необходимо обеспечить такую максимальную температуру материала, которой соответствует количество расплава, необходимое для получения прочного агломерата в верхней части слоя. Поэтому температурой зажигания следует считать только максимальную температуру поверхности слоя под горном. Она адекватно отражает свойства конкретной шихты, условия ее подготовки, влажность и концентрацию в ней топлива. Ее следует измерять прямым методом, т.е. с помощью пирометрических датчиков, направленных на поверхность слоя. Этот метод был успешно применен при проведении исследований С.Г. Ростовцевым и С.М. Мееровым уже в 1936 г. [46]. Он активно внедрялся на аглофабриках в 1970-х годах Киевским институтом автоматики, причем не только для контроля, но и для управления тепловым режимом работы горнов [59].

Обогащение кислородом воздуха горения газообразного топлива

При существующей низкой объемной концентрации топлива в слое шихты (50–90 кг/м^3) воздух оптимально совмещает функции теплоносителя и окислителя. При зажигании же горновой газ имеет пониженное содержание кислорода, что уменьшает скорость процесса спекания. Обогащение кислородом воздуха горения топлива, сжигаемого в горне, позволяет повысить температуру процесса горения, увеличить коэффициент расхода воздуха и содержание кислорода в горновых газах. Это направление активно разрабатывалось во второй половине 60-х и вплоть до 80-х годов.

Вместе с тем обогащение горновых газов кислородом сверх 15–16% дает незначительный эффект. Это объясняется тем, что в условиях низкой при агломерации концентрации топлива в слое шихты величина реакционной поверхности частиц топлива в зоне горения недостаточна для полного использования кислорода воздуха. Поэтому обогащение дутья кислородом закономерно приводит к снижению степени его использования [60].

Нижний предел содержания кислорода зависит от концентрации твердого топлива в слое и вида газообразного топлива, и находится в пределах 4–6% [60]. Однако такое содержание кислорода допустимо лишь в самом начале формирования зоны горения в слое.

Применение 100% доменного газа для зажигания возможно только при утилизации тепла агломерата с охладителя и подачи в горн воздуха с температурой 300–350 °С.

Завершающие это направление в СНГ промышленные опыты по обогащению воздуха горения кислородом проведены в 1985 г. на агломашине АКМ-312 КарМК в связи с временно образовавшимся избытком кислорода [61]. При расходе кислорода в количестве 5–6 м^3/т агл., расход твердого топлива сократился на 4,0%, а производительность агломашины и прочность агломерата на удар увеличились на 3,0 и 2,0% соответственно. Но, несмотря на полученный технический эффект, в том числе обусловленный высоким начальным расходом топлива на агломерацию, применение кислорода оказалось экономически невыгодным. В современных условиях это направление бесперспективно.

Газодинамический режим зажигания шихты

Газодинамическое сопротивление слоя шихты, поступающего под зажигательный горн, значительно меньше, а скорость фильтрации горновых газов выше, чем воздуха в основном периоде агломерации. Кроме того, пониженное содержание кислорода в горновых газах тормозит процесс горения топлива под горном. Это вызывает необходимость ограничения скорости фильтрации газов под зажигательным горном.

Задача управления давлением газов в горне, рассматриваемая как установление баланса между расходами в горне газа и воздуха, и просасываемым через слой теплоносителем путем дросселирования первых вакуум-камер, была четко сформулирована еще в 30-х годах прошлого столетия [46].

Оценка эффективности дросселирования вакуум-камер может быть выполнена на основе следующих показателей: влияние на качество агломерата, на расход газа на зажигание и на производительность агломашины.

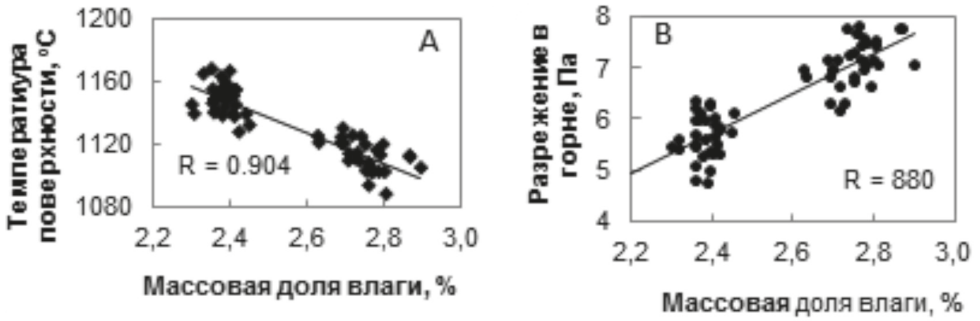


Рис. 16. Влияние добавляемой в барабане-окомкователе влажности шихты на температуру поверхности слоя (А) и разрежение в горне (В)

На агломашинах площадью по 50 м² аглофабрики Южуралникелькомбината, спекающих никелевые руды, были установлены два удлинённых горна и внедрено дросселирование с перекрытием входных сечений первых двух вакуум-камер стальными листами со щелями. Оно обеспечило снижение расхода природного газа с 560 до 320 м³/ч, т.е. на 40%. Аналогичное техническое решение применено на аглофабрике № 2 Бхилайского металлургического завода (Индия) [62]. Экономия газа составила 15% при дросселировании 1-й камеры и 26% — первых двух вакуум-камер, при этом неравномерность прочности агломерата по ширине ленты уменьшилась в 3 раза. Температуру, измеряемую термопарой под сводом горна, снизили с 1260 до 1180 °С — сократился объем подогреваемых продуктами горения топлива подсосов воздуха.

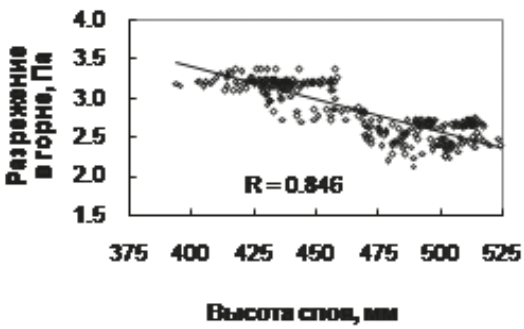


Рис. 17. Влияние высоты слоя шихты на разрежение в горне

Влияние добавляемой в барабанах-окомкователях влажности шихты на разрежение в горне и температуру поверхности слоя показано на рис. 16 [63].

Рост газодинамического сопротивления слоя из-за переувлажнения (недоувлажнения) слоя шихты аналогичен эффекту дросселирования вакуум-камеры — понижается разрежение в камере горна. Увеличение высоты слоя шихты (в опытах от 400 до 520 мм) так же сопровождается ростом его газодинамического сопротивления, и аналогично дросселированию вакуум-камер (рис. 17) [64].

Дополнительный нагрев слоя

В 1951 г. И.В. Распопов на лабораторной установке получил, что при подаче в слой после «короткого зажигания» горячего воздуха в течение первой трети процесса спекания шихты расход твердого топлива снизился на 20% [65]. Это положило начало изучению и внедрению в СССР дополнительного или как его назвали «комбинированного нагрева» шихты (далее КНШ), под которым следует понимать комбинированное воздействие на слой спекаемой шихты внутреннего и внешнего источников тепла.

Повышение прочности спека при КНШ достигается за счет создания благоприятных условий для раскристаллизации расплава при выдержке в определенном температурном интервале и снижения термических напряжений в спеке после выхода слоя из-под горна. Продолжительность дополнительного нагрева слоя определяется временем формирования над зоной горения топлива элементарного слоя такой толщины, которая достаточна для подогрева воздуха до температуры, обеспечивающей необходимую максимальная температура в зоне горения. При этом не только восполняется дефицит тепла в верхней части слоя, но и исключается избыток топлива и тепла в его нижней части за счет общего снижения расхода топлива.

Снижение от внедрения КНШ на аглофабриках СНГ расхода условного (вместе твердого и газообразного) топлива составило 6,7%, а выбросов СО в атмосферу — 138,4 тыс. т в год [66].

По техническим заданиям ВНИИМТ в 60–90-е годы удлиненные типовые горны для КНШ с боковым размещением горелок проектировались и устанавливались на поставляемых за рубеж агломашинах, в частности, в Индию, Югославию, ОАР, Венгрию, КНР, Иран.

«Короткое» зажигание шихты

Согласно японским работам [67–69 и др.] в 80-х годах прошлого столетия резервы дальнейшего снижения расхода тепла на зажигание шихты камерными горнами были исчерпаны, что обусловлено:

- большой высотой камеры горна из-за длинного факела горелок (более 1 м);
- неравномерной подачей тепла по ширине ленты из-за размещения горелок высоко над слоем;
- большой тепловой инерционностью горнов и потому невозможностью быстро реагировать на возмущения на входе в горн по влажности и высоте слоя шихты.

При разработке требований к новому зажигательному устройству, названному «линейной» горелкой, были предъявлены следующие требования: равномерность температуры по ширине ленты, формирование короткого факела, высокая температура факела.

Неравномерность распределения температур по ширине ленты устраняют путем увеличения диаметров сопел с обеих сторон горелки и ее изготовлению из 3-х секций. Свод выполняется подвижным — его высота устанавливается с помощью домкратов в зависимости от высоты слоя шихты.

Ни одна из приведенных причин, касающихся критики камерных горнов, не имеет под собой технических оснований.

Так, элементарные теплотехнические расчеты показывают, что дополнительные потери тепла кладкой при увеличении высоты горна на 1 м составляют всего 0,5%.

Относительно повышенное размещение горелок над слоем позволяет устанавливать меньшее число горелок, т.к. факелы раскрываются и смыкаются, и между ними не образуется провалов по температуре. При этом гарантируется полное сжигание газа.

Большая тепловая инерционность горнов, у которых эффективно работает радиационная составляющая, является преимуществом, т.к. она в значительной мере компенсирует влияние высокочастотных возмущений на температуру поверхности слоя. При регулировании заданной температуры поверхности ее стабилизация не представляет проблем. Регулирование высоты свода в зависимости от высоты слоя при помощи домкратов даже трудно комментировать.

На практике внедрение «короткого зажигания» на японских аглофабриках сопровождалась комплексом таких мер, как увеличение высоты слоя, улучшение сегрегации топлива по высоте слоя, подачей горячего воздуха с охладителя в горн и за него, дросселирование первых вакуум-камер. Именно эти факторы, а не конструкция устройств оказали основное влияние на снижение расхода тепла.

При «интенсивном» зажигании его продолжительность сократили с 1,5 минут до 40 с. Зона горения топлива при этом или не успевает сформироваться на полную высоту. За это время не может образоваться спек необходимой толщины над зоной горения. Поэтому такое сокращение возможно только при работе в высоком слое (600 мм), при эффективной сегрегации топлива по высоте слоя, дросселировании вакуум-камер под горном, качественном усреднении шихты, стабильных режиме возврата и влажности шихты. При спекании шихты в высоком слое переход незначительной части верхнего слоя в возврат не оказывает существенного влияния на показатели работы агломашины в целом. Работа горелок при коэффициенте расхода воздуха α = 0,8 с дожиганием газа в потоке просасываемого воздуха неизбежно сопровождается колебаниями скорости фильтрации газа через слой и, соответственно, температуры продуктов горения на входе в него при возмущениях, обусловливающих изменение сопротивления слоя шихты. Все это необходимо учитывать при попытках копирования опыта зажигания шихты в Японии.

Для аглофабрик СНГ, с учетом меньшей высоты слоя шихты, качества усреднения и подготовки шихты, несомненно, предпочтительны камерные горны. При этом не следует стремиться к низкой высоте горна. Важно обеспечить равномерное поле температур на входе в слой, а не факельное зажигание. При условии равномерного распределения температур по ширине горна горелки могут размещаться как на его своде, так и в боковых стенках. В последнем случае высота свода должна быть равной 1200 мм.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ РАБОТА АГЛОМАШИН

Эксгаустеры агломерационных машин

Эксгаустеры 12000-11-1 (5) ОАО «Энергомаш», применяемые для агломашин площадью спекания 312-336 м^2, имеют совершенные аэродинамические характеристики и высокий КПД. Их роторы оснащены двумя рядами лопаток по 24 шт. в каждом. Лопатки не защищены от абразивного износа. Ротор заменяется после того, как толщина лопаток уменьшается от исходной (14–16 мм) до 3–4 мм. Диаметр ротора — 2750 мм. При частоте вращения двигателя 1000 1/мин у ротора за счет установки повышающего редуктора она составляет 1250–1320 1/мин. На работу редуктора расходуется 4% мощности двигателя.

Диаметр роторов аналогичных по характеристикам немецких производителей (VentiOelde, TLT-Turbo, Howden Turboworke), работающих при оборотах 1000 1/мин, находится в пределах 3333–3478 мм при числе лопаток от 10×2 и 13×2 шт.

Так как абразивный износ элементов ротора пропорционален частоте его вращения в квадрате, это означает, что изначально в конструкцию эксгаустеров Энергомаша закладывается увеличенная на 56–74% интенсивность износа конструктивных элементов.

Зарубежные фирмы, в отличие от Энергомаша, поставляют в комплекте направляющие аппараты, устанавливаемые перед эксгаустерами. При работе на холостом ходу затраты мощности при их отсутствии составляют 70%, а с ними — 33% от номинальной (при использовании частотного привода — 10%) мощности. Кроме экономии электроэнергии, они существенно облегчают пуск эксгаустеров. Лопатки роторов защищаются от абразивного износа наплавкой электродами из твердых сплавов (рис. 18 — ротор Venti Oelde) или футеровочными плитами.

Рис. 18. Защита лопаток и диска ротора наплавкой из твердого сплава (Venti Oelde)

Применение футеровочных плит с креплением к лопаткам ротора болтами —сложная и затратная технология. Поставка запчастей может производиться только от фирмы — поставщика роторов. На практике выступающие гайки болтов изнашиваются неравномерно, их, как правило, открутить или подтянуть через некоторое время невозможно. Чтобы снять плиту, болты срезают и выбивают, но часто эти отверстия приходится заново высверливать. Venti Oelde применяет плиты в специальных случаях, например, когда концентрация пыли в газе превышает 400 мг/нм^3, а частота вращения ротора — 1000 1/мин.

Высота слоя спекаемой шихты

С точки зрения теплотехнической (использования тепла регенерации) увеличение высоты слоя сверх 600 мм преимуществ не дает, а сопротивление слоя растет [70].

Увеличение высоты слоя шихты с 300 мм на каждые 100 мм сопровождается снижением вертикальной скорости спекания для «легких» шихт с 9,2 до 5,3%, «средних» — с 13,8 до 7,7% и «тяже-

лых» — с 18,0 до 8,9%, причем, чем выше слой шихты, тем меньше скорость этого снижения. Подсосы воздуха для этих шихт возрастают на каждые 100 мм высоты слоя в среднем на 2,2, 2,6 и 3,4% (абс.) соответственно. Для сохранения скорости фильтрации разрежение в вакуум-камерах на каждые 100 мм высоты слоя «легких», «средних» и «тяжелых» шихт необходимо увеличивать на 0,72–1,36, 1,4–3,5 и 3,6–7,1 кПа соответственно. До 40% от этой величины компенсируется автоматически, причем, чем ближе рабочая точка к максимуму характеристики эксгаустера (т.е., чем выше слой или коэффициент его сопротивления), тем меньше величина компенсации.

Неплотности газоотводящего тракта

Влияние подсосов воздуха на параметры работы агломашины проявляется двояко: по мере уменьшения площади неплотностей уменьшаются расход газа в сети агломашины и потери давления в газоотводящем тракте, поэтому рабочая точка перемещается в сторону максимума, а с другой стороны, растет температура газа и падает его плотность, что уменьшает разрежение перед эксгаустером. Снижение щели продольного уплотнения на 1 мм сопровождается ростом производительности агломашин на 1,5–2,1%. Чем выше слой шихты или коэффициент его сопротивления, тем меньше в указанных пределах прирост производительности агломашины [70].

Площадь спекания агломашины

С увеличением площади спекания рабочая точка характеристики эксгаустера перемещается в сторону понижения развиваемого давления и увеличения расхода газа. Также растет сопротивление газоотводящего тракта. Эти факторы обусловливают понижение разрежения в вакуум-камерах, скорости фильтрации газа через слой, вертикальной скорости спекания и, как следствие, удельной производительности агломашины. Поэтому эффект от увеличения площади спекания агломашины не пропорционален ее приросту.

Увеличение до 25% площади спекания на каждый 1% сопровождается ростом производительности агломашин с высокой герметичностью вакуумной системы на 0,5–0,7%, с низкой герметичностью — на 0,3–0,5%. Удельный расход электроэнергии снижается на 0,25–0,50% на 1% увеличения площади спекания [70].

Увеличение площади спекания за счет расширения паллет гораздо эффективнее по сравнению с удлинением агломашины, что связано с разным изменением количества подсосов воздуха в газоотводящий тракт.

Живое сечение элементов газоотводящего тракта

Увеличение живого сечения элементов газоотводящего тракта снижает его сопротивление, поэтому уменьшается разрежение в сети и увеличивается производительность эксгаустера. При этом разрежение под колосниковой решеткой и, как следствие, производительность агломашины растут. Мощность, потребляемая двигателем эксгаустера, практически не изменяется, а удельный расход электроэнергии снижается.

Дросселирование вакуум-камер

Комплексная оценка влияния дросселирования вакуум-камер на работу агломашины предполагает учет изменения расхода тепла на внешний нагрев слоя, равномерности распределения температур по ширине паллет под горном, усадки слоя шихты, количества подсосов воздуха в первые вакуум-камеры и сопротивления газоотводящего тракта в целом [70].

Дросселирование элементов газоотводящего тракта увеличивает его сопротивление и, тем самым, уменьшает перепад давлений газа в слое, а, следовательно, скорость фильтрации воздуха на входе в слой и вертикальную скорость спекания. Исключением являются первые и последние вакуум-камеры, так как в результате сокращения количества подсосов воздуха через торцевые уплотнения разрежение в системе увеличивается.

В работе [72] оценена взаимосвязь разрежения в первых двух дросселируемых вакуум-камерах и в системе в целом для возможности прогноза и регулирования места окончания процесса спекания

(рис. 19). Получено, что данные о начальной газопроницаемости слоя шихты могут служить только в качестве первичной информации, в основном о возмущениях по влажности шихты, а решения о начале регулирования процесса спекания могут приниматься в последующие ~ 40% времени процесса спекания. Этого времени достаточно, для того, чтобы решение было своевременным и эффективным.

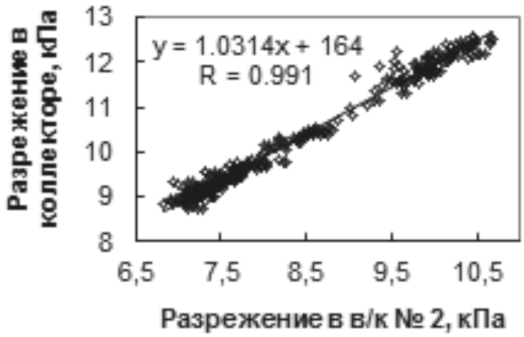


Рис. 19. Взаимосвязь между разрежением в вакуум-камере № 2 и в сборном коллекторе агломашины АКМ-31

Температура отходящих газов, давление и температура окружающей среды

Расчетный анализ влияния температуры и давления окружающей среды, а также теплоизоляции газоотводящего тракта на показатели процесса спекания, выполненный на примере агломашины АКМ-75 КарМК, показал следующее [70]. При уменьшении температуры окружающего воздуха от +30 до –30 °С температура газа перед эксгаустером снижается с 132 до 97 °С, разрежение под слоем и перед эксгаустером возрастает с 5,65 до 6,03 кПа и с 8,7 до 9,25 кПа соответственно, тяга дымовой трубы — от 0,10 до 0,24 кПа, производительность агломашины — на 3,7% (несмотря на рост подсосов воздуха с 53,8 до 56,3%). На агломашине АКМ-312 КарМК температура отходящих газов снизилась со 137 °С летом до 94 °С зимою, а разрежение перед эксгаустерами выросло с 11,13 до 12,18 кПа.

Снижение температуры газа перед эксгаустером при работе машины без теплоизоляции тракта сопровождается ростом производительности агломашин на каждые 10°С снижения температуры на 2,0–2,1% при увеличении удельного расхода электроэнергии на 0,7%. Поэтому, там, где это не противоречит нормам безопасности, в теплоизоляции элементов газоотводящего тракта нет необходимости.

При уменьшении барометрического давления атмосферы снижаются плотность газа и разрежение перед эксгаустером, и, как следствие, скорость фильтрации газа через слой. Увеличение высоты размещения аглофабрики на каждые 1000 м над уровнем моря сопровождается снижением производительности агломашины на 1,4%.

Дымовая труба

Тяга дымовой трубы должна быть больше потерь давления в ее тракте, включая саму трубу, которая должна работать на «самотяге». В противном случае энергия эксгаустера будет расходоваться на преодоление сопротивления тракта дымовой трубы, что повлечет за собою снижение разрежения перед эксгаустером и в коллекторе и, как следствие, производительности агломашины.

Неравномерность распределения газовых потоков между параллельно установленными эксгаустерами

По данным [73], полученным с использованием математической модели [70], увеличение подсосов воздуха в один из двух батарейный циклонов с 10,3 до 20,6% сопровождалось снижением производительности агломашины на 3,8%.

Одновременное использование нового и изношенного роторов параллельных эксгаустеров снизило производительность агломашины на 1,6%, а оставленная после ремонта прикрытой на 200 мм заглушка — на 1,1%.

Разница в сроке службы роторов эксгаустеров из-за неравномерности распределения потоков ограничивается 25%.

Применение высоконапорных эксгаустеров

На современных зарубежных фабриках, спекающих структурно устойчивые шихты, в сборном коллекторе поддерживают разрежение ~15 кПа без каких либо негативных последствий для процесса спекания. Для отечественных условий, за исключением аглофабрики НЛМК, рациональная ве-

личина разрежение в коллекторе ограничена и не превышает 12 кПа, что в основном связано с усадкой шихты на основе тонких концентратов.

ОХЛАЖДЕНИЕ АГЛОМЕРАТА

Для анализа процесса охлаждения агломерата на линейных (кольцевых) охладителях разработана трехмерная (динамическая) математическая процесса охлаждения насыпного слоя агломерата[2].

На модели исследованы варианты охлаждения агломерационного спека на охладителе ОП-315 с высотою слоя от 750 до 1200 мм, с применением дутьевых вентиляторов ВДН-24 и ВДН-26 и «прямой», «обратной» и равномерной (шахтной) по распределению фракций спека по высоте слоя.

Для проведения исследований на модели использованы данные производства агломерата на агломашинах АКМ-312 и линейных охладителях ОП-315 меткомбината Северсталь. Баланс продуктов и гранулометрический состав агломерационного спека приведены в табл. 4.

Таблица 4. Баланс продуктов и гранулометрический состав агломерационного спека

Материал	Расход, т/ч	Фракционный состав, %					
		Фракции, мм					
		+ 63	40–63	25–40	10–25	5–10	–5
Агломерат	260	2,23	6,81	7,23	33,13	32,05	18,55
Холодный возврат	150				14,88	42,53	42,59
Горячий возврат	50					1,22	98,78
Постель	140				+ 6,63	35,71	57,66

Как следует из данных табл. 4, значительное количество образующегося после охлаждения холодного возврата и мелочи фракции менее 5 мм в постели создает условия, близкие к таковым при производстве агломерата без отсева горячего возврата. Общая нагрузка на охладитель составляет ~550 т/ч, очень высокая насыпная масса материала — 2100 кг/м^3, высота слоя на охладителе — 750 мм, скорость полотна охладителя — 1,6 м. Давление в камерах дутьевых вентиляторов в базовом варианте принято по промышленным данным.

Визуализация расчетов на модели по распределению температур в слое при прямой, обратной и равномерной загрузки спека на охладитель показана на рис. 20–22.

Анализ вариантов охлаждения агломерационного спека на математической модели позволил сделать следующие основные выводы.

- Наиболее эффективное охлаждение агломерационного спека осуществляется при условии равномерного распределения фракционного состава и начальной температуры по высоте слоя.
- Средняя начальная температура агломерационного спека несущественно влияет на результаты его охлаждения, так как при этом растет разность температур материала и воздуха и интенсивность теплообмена между ними.
- Для всех типов эксплуатируемых линейных охладителей вариантом улучшения охлаждения агломерата является увеличение высоты слоя агломерата на 100–150 мм выше бортов тележек.
- При замене действующих охладителей и установке новых эффективно применять тележки с высотою бортов 1200 мм, заменяя одновременно два первых дутьевых вентилятора ВДН-24 на ВДН-26. Высота слоя 1200 мм выбрана в условиях производства агломерата из тонких концентратов, и это рациональная высота слоя в отличие от 1500 мм при спекании рудных шихт.

[2] Л.И. Полоцким, Ю.А. Фроловым, Л.И. Каплуном.

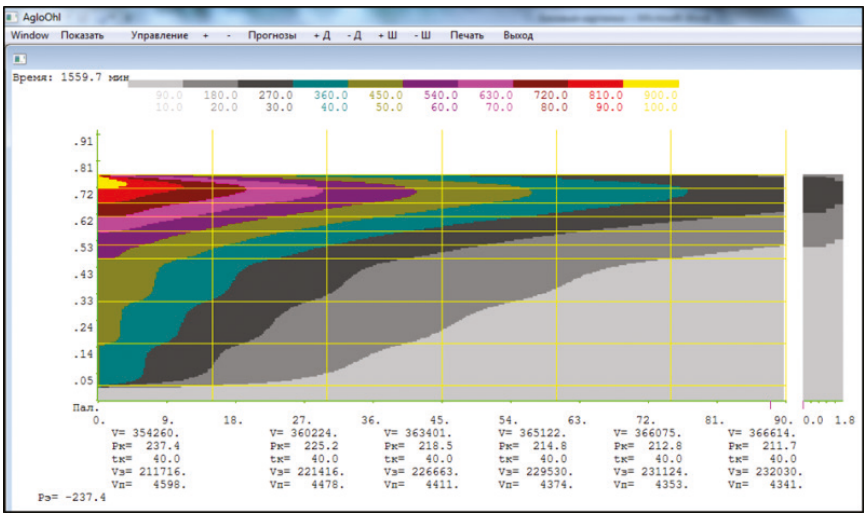


Рис. 20. Прямая загрузка спека на охладитель

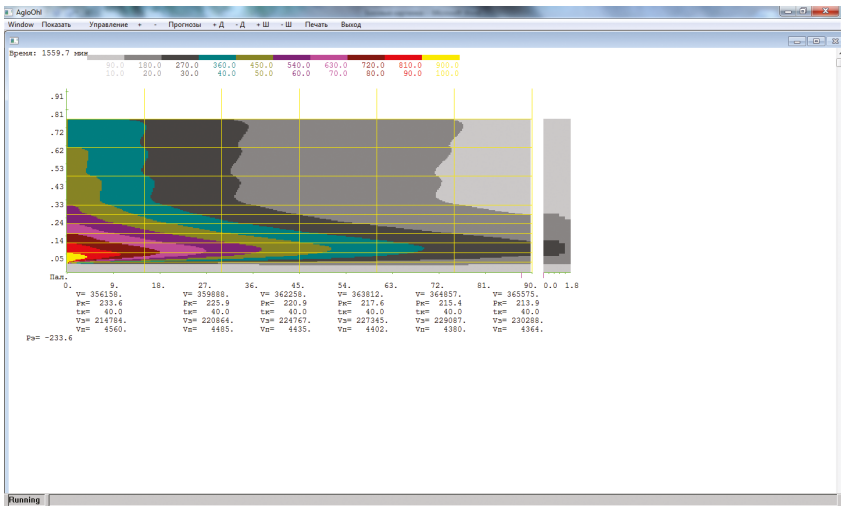


Рис. 21. Обратная загрузка спека на охладитель

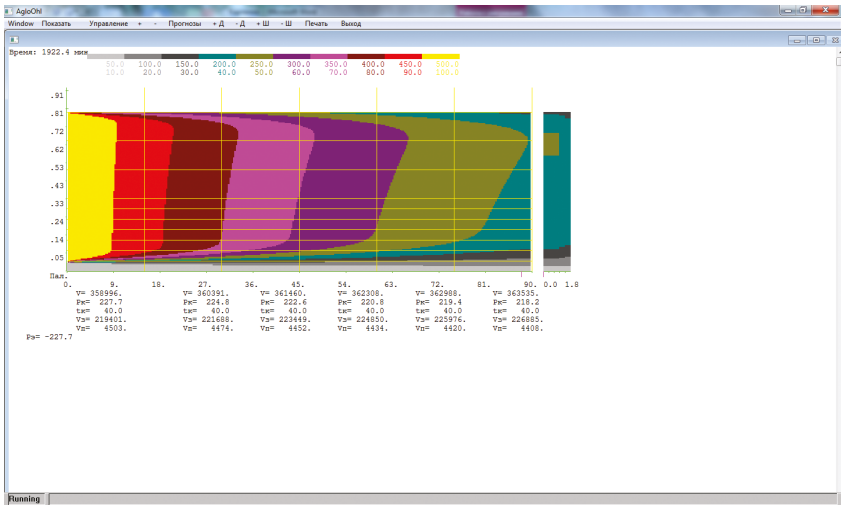


Рис. 22. Равномерная (шахтная) загрузка спека на охладитель

- При строительстве новых аглофабрик оптимальным вариантом является технология производства агломерата без отсева горячего возврата с обратной загрузкой агломерационного спека на линейный (кольцевой) охладитель с высотою бортов 1200 мм. Для линейного охладителя при этом следует устанавливать 2 первых дутьевых вентилятора повышенной мощности.
- Самым эффективным для охлаждения агломерата и для утилизации его тепла в энергетических и технологических целях является вариант применения противоточного (шахтного) охладителя.

Список литературы

1. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Введение в технологию металлургического структурообразования. Екатеринбург. УрО РАН. 2005. 501 с.
2. Использование тощих углей в агломерационном производстве. М.С. Баранов, Ю.А. Фролов, Н.К. Чевлытко, В.А. Яковлев. Обзорная инфор. ин-та Черметинформация. М.: Металлургия. 1980. сер. 3. вып. 2. 38 с.
3. Карабасов Ю.С., Валавин В.С. Использование топлива в агломерации. М.: Металлургия. 1976. 264 с.
4. K. Auliman. Stahl und Eisen. № 2. 1994. p. 7–11.
5. Фролов Ю.А, Бездежский Г.Н., Малыгин А.М. Подготовка топлива к агломерации руд и концентратов на конвейерных машинах / Ю.А. Фролов, // Цветная металлургия. 2002. № 8–9. С. 10–15.
6. Коротич В. И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов. М.: Металлургия. 1966. С. 152 с.
7. Хохлов Д.Г., Коморников Г.И. Влияние влажности и тонины помола концентрата на качество смешивания и прочность агломерата. Сталь. 1967. № 3. С. 193-197.
8. А. Маслянка, В. Сабела. Спекание аглошихты с высокой долей концентрата. Черные металлы. 1975. № 13. С. 3–7.
9. М. Судзуки, С. Кисимото, М. Кавада и др. Работа агломашины № 4 в Фукуяме с высокой производительностью и выходом годного агломерата. Дзайре то пуросэсу. 1995. Т. 8. № 4. С. 906.
10. К. Ватанабэ, К. Вакимото, Ю. Ямада и др. Повышение общего выхода годного агломерата на комбинате в Кэйхине. Дзайре то пуросэсу. 1995. Т. 8. № 4. С. 907.
11. Анализ работы барабанных окомкователей при окомковании тонкозернистых шихт. Г.И. Коморников Коротич В.И., Малыгин А.В. и др. Сталь. 1977. № 8. С. 685–688.
12. Пузанов В.П. В.А. Кобелев Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз. Екатеринбург. УрО РАН. 2001. 634 с. Агломерация. Учебное пособие. Екатеринбург. УГТУ-УПИ. 2009. 417 с.
13. Серебряник Г.И. Исследование процесса и разработка способов улучшения качества подготовки агломерационной шихты к спеканию. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: Ин-т металлургии им. Байкова. 1975. 18 с.
14. H. Wittenberg, K. Mejer. Stahl und Eisen. 1943. № 45. P. 817-824. № 46. P. 840–846.
15. Базилевич С.В., Жунев А.Г. Повышение качества агломерата и увеличение производительности агломашин. Черная металлургия, 1977. № 5. С. 3–9.
16. Коршиков Г.В., Невмержицкий Е.В., Хайков М.А. и др. Влияние извести на процесс спекания тонкоизмельченных концентратов. Сталь 1974. № 1. С. 7–12
17. Исследование процесса агломерации для модернизации агломерационной фабрики № 2 ОАО «ЧМК» с охлаждением агломерата на агломерационных машинах. Ю.А. Фролов, А.Г. Птичников, В.Х. Баринов, Н.Н. Горшков. Черная металлургия. Бюл. Научно-технической и экономической информации. 2010 г. № 2. С. 8–17.
18. Устройства для смешивания железорудных шихт. Н.М. Флакс и др. Обзорная информация. Ин-т. «Черметинформация». 1980. сер. 3. вып. 1. 30 с.
19. Улучшение окомкования доменного сырья с использованием смесителя с высокоскоростной лопастной мешалкой на аглофабрике № 3 в Кокуре. Я. Хадано и др. Ironmaking conference proceedings. 1995. № 54. P. 535–540.

20. Я. Хадана, Т. Мураи, Е. Кавагути и др. Совершенствование окомкования шихты с использованием высокоскоростного смесителя на аглофабрике № 3 в Кокуре. Ironmaking conference proceedings. 1995. № 54. P. 535–540.
21. Suzuki S. Исследование технологии предварительной обработки аглошихты. Сообщ. 1. Псевдоокомкование аглошихты посредством окомкователя с высокоскоростной мешалкой. Тэцу то хаганэ. J. Iron and Steel Inst. Jap. 1985. v. 71. № 4. C. 21.
22. Suzuki S. Сравнительные характеристики окомкователей аглошихты. Тэцу то хаганэ. J. Iron and Steel Inst. Jap. 1986. v. 72. № 12. C. 821.
23. Смирнов В.С. Пути интенсификации процесса окомкования железорудных концентратов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Днепропетровск: ДМетИ. 1976. 35 с.
24. Operation results of separated granulation equipment at Wakayama № 4 Sinter Plant / Atsuhiro Oboho, Tsuyosi Shoulho, Watsuya Tajiri (Wakayama Steel Works). Kouichi One (Corporate Research & Development Laboratory). Masaru Matsumura (Kazhima Steel Works). Conference in Canada. 1998. 9 ps.
25. Виноградов В.В. Работа агломерационных машин при повышенной начальной температуре шихты. Тр. науч.-техн. об-ва черной металлургии. Т. V111. Материалы совещания по агломерации и доменному производству. М.: Гос. Науч.-техн. изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии. 1956. С. 227–248.
26. Кантони Ж., Дидье А., Мейсон Н. и др. Предварительный подогрев шихты при агломерации // Iromaiking Conference. Proceedings. 1978. N. 37. P. 438–444.
27. Пузанов В.П., Мищенко И.М. Влияние предварительного подогрева шихты на ее качество. Сб. тр. Повышение эффективности рудоподготовки при окусковании. Свердловск. Уралмеханобр. 1982. С. 30–39.
28. Мищенко И.М., Пузанов В.П., Капуста А.И. и др. Об эффективности подогрева агломерационной шихты различными теплоносителями. Теплотехника и газодинамика агломерационного процесса. Мат-лы республ. семинара. Киев. Наук. думка. 1983. С. 57–62.
29. Мееров С. М. // Теория и практика металлургии. 1937. № 6. С. 51.
30. Фролов Ю.А. Теплотехнические аспекты процесса агломерации. Сталь. № 12. 2003. С. 2–11.
31. Сокол А. Н., Мысик А. Ф., Фролов Ю. А. и др. // Библ. указатель ВНИИПИ «Депонированные научные работы». 1985. № 5. — 19 с.
32. Kavasaki M. CURR Adv. Mater. and Proc. 1990. № 1. P. 58–65.
33. Система управления тепловым состоянием слоя по ширине паллеты // Тэцу то хаганэ — J. Iron and Steel Inst. Jap. 1990. V. 76. № 6. P. 825–831.
34. Т. Хаук, и др. Наблюдение за работой агломерационных машин. Черные металлы. 2003. № 10. С. 25–29.
35. Фролов Ю.А. Анализ газодинамической работы агломерационных машин. Сталь. 2005. № 6. С. 42–51.
36. A process model for uniform transverse distribution in a sinter plant / S. Mitra, M. et al. // Steel Time International. 2005. 29. 5. P. 17–18.
37. Ю.А. Фролов, В.Н. Богатиков, Г.Е. Исаенко и др. Исследование процесса агломерации с использованием информации новой АСУ ТП агломерационной машины АКМ-312 ОАО «НЛМК». Сталь. 2010. № 5. С. 24–29.
38. Полоцкий Л.И., Фролов Ю.А., Исаенко Г.Е., Сапрыкин А.Н. Оптимизация работы челнокового распределителя узла загрузки шихты на агломерационную машину. Труды Междунар. научн. практ. конф. 11-14 февраля 2009 г. Екатеринбург. УГТУ-УПИ. С. 187–192.
39. Frolov Y. A., Das A., Moyalan J. P. et. al. (RDCIS SAIL) Rational mix charging practice and fuel conservation in sintering process; International Symposium. Moscow. Oct. 1995. 16 p.
40. Фролов Ю.А., Птичников А.Г., Баринов В.Х., Горшков Н.Н. Исследование процесса агломерации для модернизации агломерационной фабрики № 2 ОАО «ЧМК» с охлаждением агломерата на агломерационных машинах /Черная металлургия. Бюл. Научно-технической и экономической информации. 2010 г. № 2. С. 8–17.

41. Фролов Ю.А., Братчиков С.Г., Заславский Е.Е., Статников Б.Б. Исследование сегрегации агломерационных шихт. Сталь. 1974. № 10. С. 882–888.
42. Берштейн Р.С., Фролов Ю.А. Оптимальная технология спекания шихты в высоком слое. Металлург. 1976. № 7. С. 12–13.
43. Frolov Y.A., Das A., Moyalan J.P., etc. (RDCIS SAIL) Rational mix charging practice and fuel conservation in sintering process; International Symposium. Moscow. Oct. 1995. 16 ps.
44. Фролов Ю.А., Расин Б.С., Зевин С.Л. и др. Анализ газодинамической работы агломашин АКМ-312 Новолипецкого металлургического комбината. Сталь. 1993. № 2. С. 5–10.
45. M. Kavasaki. Development of method for packing top layer of the sinter bed. CURR Adv. Mater. Fnd. proc. 1990. № 1. P. 58.
46. Ростовцев С.Г., Мееров С.М. Зажигание в процессе спекания криворожских железных руд. Теория и практика металлургии. 1936. № 2. С. 12–22.
47. Ковальский Л.Л. Расчет зажигательного горна агломерационной машины Дуайт-Ллойда. Уральская металлургия. 1938. №№ 7, 8. С. 45–48.
48. Братчиков С.Г. В.И. Тумашев. О режиме зажигания при агломерации. Изв. Вузов. Черная металлургия. 1965. № 2. С. 24–27.
49. Сигов А.А. О роли регенерации тепла и зажигании в агломерационном процессе. Изв. Вузов. Черная металлургия. 1959. № 2. С. 13–25.
50. Никитин А.И., Арбузов В.А. Агломерация железных руд. Металлургиздат, 1957. 185 с.
51. Wingate. Industrial heating. 1962. № 2. P. 277–279.
52. Р. Дженнингс, А. Грив. Бил. ЦИИ ЧМ, 1964. Основы проектирования агломерационных фабрик. Хантинтонг и Ко. Англия. Агломерация и производство окатышей. С. 13–19.
53. Киссин Д.А. Металлург. 1965. № 3. С. 3.
54. Базилевич С.В., Вегман Е.Ф. Агломерация. М.: Металлургия. 1967. 368 с.
55. Сигов А.А., Шурхал В.А. Зажигание агломерационных шихт. Сталь. 1969. № 5. С. 389–392.
56. Шурхал В.А., Лысенко И.С., Якубовский В.П. Внешний нагрев слоя при агломерации. Академия наук Украинской ССР. Институт газа. Изд-во «Наукова думка». Киев. 1972. 64 с.
57. Шурхал В.А. Внешний нагрев слоя при агломерации. Киев. Наукова думка. 1985. 192 с.
58. Фролов Ю.А, Майзель Г.М., Бубнов Д.П. и др. Выбор вида топлива для зажигания и комбинированного нагрева агломерационных шихт. Сталь. 1970. № 10. С. 878–882.
59. Федоровский Н.В., Васильев Ю.В. Теплотехника и газодинамика агломерационного процесса. Материалы республиканского семинара. Киев. Наукова думка. 1983. С. 143–146.
60. Бабушкин Н. М., Тимофеев В. Н. Сборник научных трудов ВНИИМТ Металлургиздат, 1962. № 7. С. 17–46.
61. Фролов Ю.А, Витущенко М.Ф., Добряков Г.Г. Обогащение кислородом горновых газов при внешнем нагреве агломерационной шихты / Л.К. Герасимов, // Режимные и конструктивные параметры тепловых металлургических агрегатов: сб.. Металлургия, 1986. С. 5–8.
62. D.K.S. Bhadoria, Y.A. Frolov, A. Das. M.T. etc. Development of optimal ignition technology for Sinter Plants of SAIL. 4th Indian Ironmaking Conference. Ranchi. India. 1996. P. 199–216.
63. Исследование процесса агломерации с использованием информации новой АСУ ТП агломерационной машины АКМ-312 ОАО «НЛМК» / Ю.А. Фролов, В.Н. Богатиков, Г.Е. Исаенко, и др. // Сталь. 2010. № 5. С. 24–29.
64. Ю.А. Фролов, В.Н. Богатиков, Г.Е. Исаенко и др. Исследование влияния высоты слоя шихты на процесс агломерации. Черная металлургия. Бюл. Научно-технической и экономической информации. 2010 г. № 10. С. 45–49.
65. Распопов И.В. Новое направление в проектировании агломерационных фабрик. Труды НТО ЧМ. Металлургиздат. 1956, т. 8. С. 142–143.
66. Фролов Ю.А., Алексеев Л.И., Чистополов В.А. Применение комбинированного нагрева на агломерационных фабриках. М., 1979. 35 с. (Обз. информ. / ЦНИИЧМ. «Подготовка сырых материалов к металлургическому переделу», Вып. 1).
67. Сайно М., Такахаши Х., Танака Т. Тэцу то хагане. 1985. Т. 71. № 16. С. 1985–1991.

68. Такасима К., Каминака М., Тофу К. и др. Тэцу то хагане. 1986. Т. 72. № 12. С. 889–890.
69. Каваками С., Хисиэто М., Морита М. и др. Тэцу то хагане. 1986. Т. 72. № 12. С. 891–897.
70. Фролов Ю.А. Анализ газодинамической работы агломерационных машин. Сталь. 2005. № 6. С. 42–51.
71. Ю.А. Фролов, В.Н. Богатиков, Г.Е. Исаенко и др. Исследование влияния высоты слоя шихты на процесс агломерации. Черная металлургия. Бл. Научно-технической и экономической информации. 2010 г. № 10. С. 45–49.
72. Исследование процесса агломерации с использованием информации новой АСУ ТП агломерационной машины АКМ-312 ОАО «НЛМК» / Ю.А. Фролов, В.Н. Богатиков, Г.Е. Исаенко, и др. // Сталь. 2010. № 5. С. 45–49.
73. Raju M.T., Frolov Y.A., Mondel S. Operational features of Sinter Machine with two parallel exhausters. 4-th Indian Ironmaking Conference. Ranchi. India. 1996. P. 383–389.
74. Бабушкин Н.М., Братчиков С.Г., Намятов Г.Н. и др. Охлаждение агломерата и окатышей. М., Металлургия. 1975. 208 с.
75. Раков А.И., Расин Б.С., Певная Э.А. Технико-экономический анализ способов охлаждения агломерата. Повышение качества окускования материалов: Темат. отрасл. сб. 1984. №1. С. 4.
76. Рациональная тепловая схема охлаждения агломерата на линейном охладителе / Б.С. Расин, А.И. Раков, В.Н. Бургов, Ю.А. Фролов // Интенсификация процессов окускования: сб. науч. тр. Киев: Наукова думка, 1987. С. 107–111.

Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, НИТУ «МИСиС»
А.Н. Шаповалов, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»

НОВЫЙ ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ДОБАВОК В АГЛОМЕРАЦИОННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Используемые в агломерационном производстве магнезиальные материалы по своему химическому и минералогическому составу отличаются большим разнообразием, что отражается как на показателях аглопроцесса, так и на качестве магнезиального агломерата.

В условиях АО «Уральская Сталь» в качестве магнезиального компонента агломерационной шихты применяются сидериты Бакальского рудоуправления (БРУ). Расход сидерита БРУ в количестве 120–140 кг/т обеспечивает получение агломерата с содержанием магнезии на уровне 1,8–2,2 %. Использование такого агломерата в доменной плавке при его доле в шихте ~ 70 % позволяет поддерживать содержание MgO в шлаке в пределах 5–7 % [1].

По своему минералогическому составу бакальский сидерит представляет собой изоморфную смесь карбонатов железа, магния и марганца, а химический состав данного материала позволяет рассматривать его как магнезиальный железофлюс [2].

Для металлургической промышленности Южного Урала бакальский сидерит является одним из основных магнезиальных материалов, вовлекаемых в аглодоменный передел. Вместе с тем, в Оренбургской области в настоящее время ведется разработка Халиловского месторождения магнезитов, расположенного в непосредственной близости от АО «Уральская Сталь». Добываемые магнезиты получили широкое распространение в промышленности, в то время как сопутствующий им серпентинитомагнезит, представляющий собой водный силикат магния с содержанием MgO до 40%, в настоящее время используется ограниченно. Однако, его вовлечение в агломерационное производство в качестве магнезиальной добавки может иметь большое практическое значение для металлургической промышленности.

Возможность использования серпентинитомагнезитов в аглопроизводстве предварительно оценивалась на основе сравнительного анализа его химического состава с химическим составом бакальского сидерита (табл.1).

Таблица 1. Химический состав магнийсодержащих материалов

Материал	Химический состав (по массе),%								
	$Fe_{общ}$	FeO	Fe_2O_3	MgO	CaO	SiO_2	MnO	S+P	п.п.п
Бакальский сидерит	28–30	34–38	5–0,5	9–13	3,5–5	2,5–11	1–2	0,15–0,35	33–36
Серпентинитомагнезит	4–7	5–8		35–40	0,05–1,2	36–40	0–0,1	0,03–0,05	13–16

Из представленных данных видно, что серпентинитомагнезит отличается высоким содержанием магнезии, большей чистотой по содержанию вредных примесей и значительно меньшими потерями при прокаливании, в сравнении с бакальским сидеритом, однако, он также обладает высоким содержанием кремнезема, что ведет к снижению содержания железа в агломерате [3].

Экспериментальные и литературные данные о поведении материалов при нагреве позволили установить, что в интервале температур до 700 °С оба исследуемых материала испытывают потребность в тепле (на разложение карбонатов сидероплезита и выделение конституционной воды из кристаллической решетки серпентина соответственно). А при температурах свыше 800 °С их поведение различно. В случае с бакальским сидеритом при нагреве свыше 800 °С начинаются энергозатратные процессы разложения известняка, сопутствующего сидероплезиту, в то время, как у серпентинитомагнезита в том же температурном интервале начинается образование форстерита, сопровождающееся выделением значительного количества тепла [4, 5].

На основе полученных данных был сделан вывод о возможной компенсации затрат тепла на диссоциацию карбонатов сидерита при его нагреве совместно с серпентинитомагнезитом. В результате, было принято решение рассмотреть возможность использования в агломерационном процессе комбинированного магнезиального флюса, представляющего собой смесь бакальского сидерита и серпентинитомагнезита. Предварительные расчеты показали, что оптимальным соотношением компонентов (в тепловом отношении) является 1/4, где на одну часть серпентинитомагнезита приходится четыре части сидерита.

При составлении плана экспериментов были определены следующие «начальные» условия:

- химический состав экспериментального агломерата принимался «базовый» (2% MgO и CaO/SiO_2 = 1,5), что соответствует условиям работы агломерационного цеха АО «Уральская Сталь»;
- оптимальное содержание углерода в шихте подбиралось экспериментальным путем для условий содержания FeO в агломерате 10–12%;
- содержание серпентинитомагнезита в магнезиальной смеси изменялось от 0 до 20% с шагом 5%.

Также была проведена серия спеканий со 100% серпентинитомагнезита. Следует отметить, что высокое содержание кремнезема в его составе предопределяет высокий расход концентрата на спекание, что значительно ухудшает условия окомкования. Поэтому при планировании эксперимента с использованием в качестве магнезиальной добавки 100% серпентинитомагнезита требования к содержанию железа в агломерате были снижены на 1%.

В состав экспериментальной шихты кроме сидерита БРУ входили компоненты, традиционно используемые в аглоцехе АО «Уральская Сталь» — аглоруда и концентрат Михайловкого ГОКа, коксовая мелочь собственного коксохимического производства (КХП) и доменного цеха, известняк Аккермановского месторождения, возврат. Каждый эксперимент повторялся не менее 3 раз. Условия и усредненные результаты опытных спеканий представлены в таблицах 2 и 3.

Данные, представленные в таблице 3, показывают, что замена бакальского сидерита на серпентинитомагнезит в аглошихте для условий содержания 2% MgO в агломерате оказывает положительное влияние на прочностные свойства агломерата, однако технологические параметры аглопроцесса (скорость спекания, выход годного и производительность) имеют тенденцию к ухудшению.

Таблица 2. Условия проведения экспериментов

Параметры	Содержание серпентинитомагнезита в комбинированной смеси, %					
	0	5	10	15	20	100
MgO в агломерате, %	2,0					
CaO/SiO_2, ед.	1,5					
Fe в агломерате, %	52,0					51,0
Содержание углерода, %	4,3					4,2
Расход шихты на опыт, кг/т:						
Аглоруда Михайловского ГОКа	197,9	119,8	119,4	119,2	119,0	118,2
Концентрат МихГОКа	523,8	607,6	614,5	620,0	624,6	652,4
Возврат и отсев	323,7	328,5	329,2	329,8	330,3	333,2
Известняк	215,2	223,1	224,5	225,7	226,7	232,7
Аглоруда БРУ	128,2	113,4	96,2	83,3	70,8	0
Серпентинитомагнезит	0	5,8	10,5	14,2	17,3	36,5

Таблица 3. Усредненные результаты спеканий с использованием магнезиальных смесей при разном соотношении компонентов

Параметры	Содержание серпентинитомагнезита в комбинированной смеси, %					
	0	5	10	15	20	100
Расчетное содержание в агломерате:						
MgO, %	2,0					
CaO/SiO_2, ед.	1,5					
Fe, %	52,0					51,0
Фактическое содержание в агломерате:						
MgO, %	2,10	2,1	2,0	2,3	2,3	2,10
CaO/SiO_2, ед.	1,46	1,57	1,59	1,58	1,56	1,54
Fe, %	52,5	52,1	52,2	52,2	52,1	51,2
Влажность шихты, %	7,20	7,00	7,20	7,80	7,20	8,0
Высота спекаемого слоя, мм*	320–340					
Относительная усадка, %	11,15	10,23	10,47	8,76	7,00	6,57
Скорость спекания, мм/мин	17,97	18,05	16,83	16,19	14,91	14,58
Выход годного из спека, %	66,68	73,05	75,79	72,33	75,17	76,95
Прочность на сбрасывание (фракция +5 мм), %	83,71	85,38	84,94	86,04	86,07	88,73
Производительность по годному агломерату, т/(м^2·ч)	1,26	1,26	1,23	1,14	1,11	1,09
Прочность на удар (доля фр. 5–40 мм), %	64,7	67,0	72,0	71,9	72,7	76,0
Сопротивление истиранию (доля фр. 0–0,5 мм), %	5,60	5,49	5,30	5,11	4,90	5,30

*) Высота спекаемого слоя указана с учетом пастели

Для определения оптимального соотношения компонентов в магнезиальной смеси были построены зависимости всех рассматриваемых показателей от содержания серпентинитомагнезита в комбинированном флюсе. Результаты спеканий со 100-процентной заменой сидерита на серпентинитомагнезит при этом не учитывались (рис. 1–4).

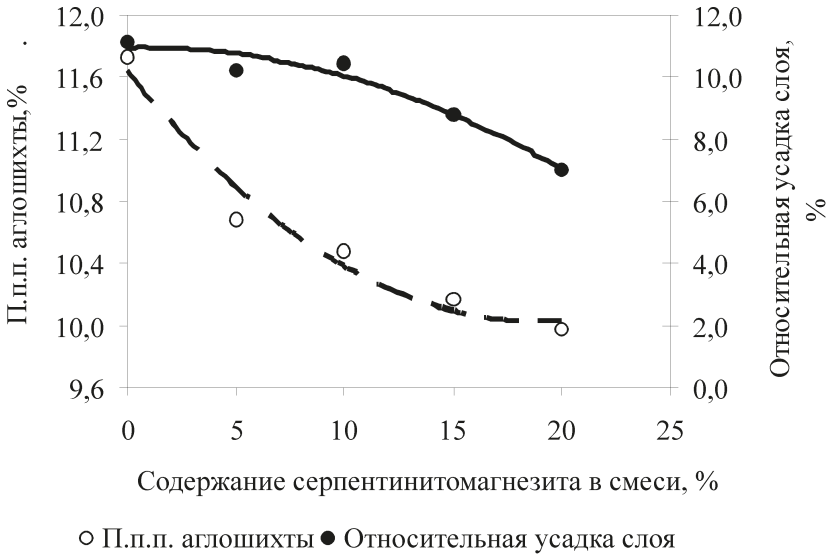


Рис. 1. Влияние содержания серпентинитомагнезита в магнезиальной смеси на изменение потерь при прокаливании аглошихты и относительную усадку слоя

Из рисунка 1 следует, что увеличение доли серпентинитомагнезита в смеси способствует уменьшению потерь при прокаливании (п.п.п) и, соответственно, относительной усадки слоя.

Зависимости скорости спекания и удельной производительности по годному агломерату от состава смеси (рис. 2) показывают, что увеличение в них доли магнезиального материала на основе силиката магния ведет к монотонному снижению рассматриваемых показателей.

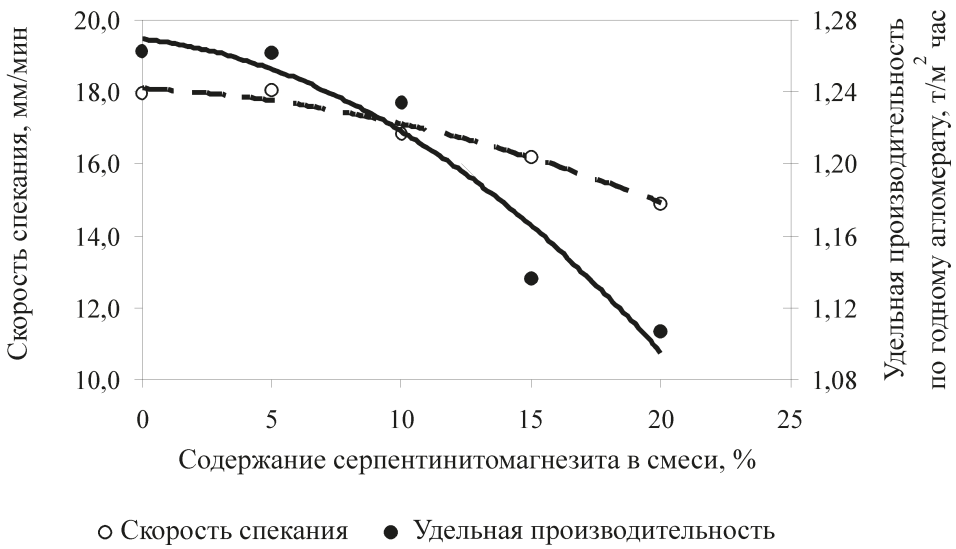


Рис. 2. Изменение скорости спекания и удельной производительности по годному агломерату в зависимости от доли серпентинитомагнезита в смеси

Из рисунка 3 следует, что использование серпентинитомагнезита в смеси благоприятно сказывается на прочности агломерата после сбрасывания, однако его положительное влияние на выход годного из спека носит экстремальный характер с максимумом в точке 10%.

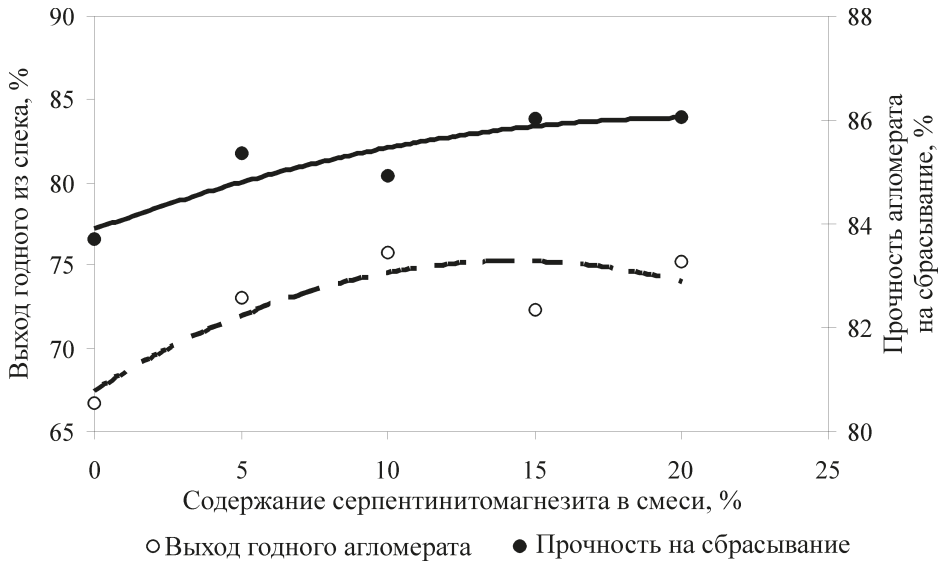


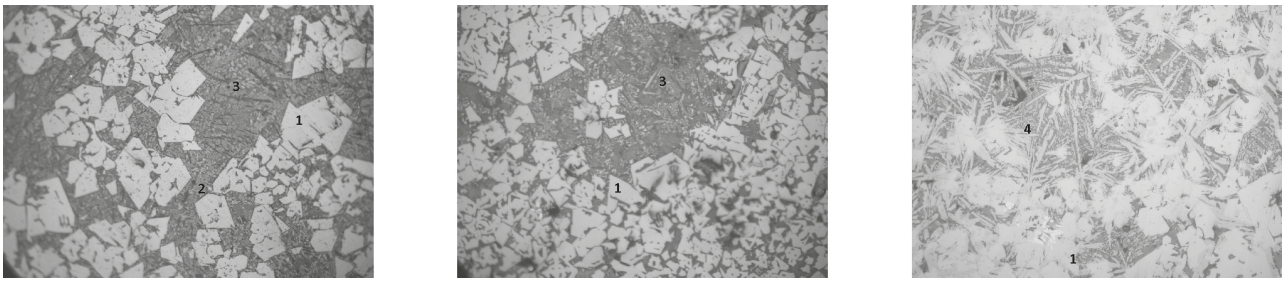
Рис. 3. Выход годного и прочность спека на сбрасывание с разным содержанием серпентинитомагнезита в смеси

Рис. 4. Прочность агломерата на удар и истирание с разным содержанием серпентинитомагнезита в смеси

Результаты барабанных испытаний исследуемых агломератов (рис. 4) показывают, что с ростом содержания серпентинита в смеси до 15% происходит заметное улучшение их прочностных показателей. При дальнейшем его увеличении до 20% отмеченная тенденция почти не прослеживаться.

Анализ микроструктуры агломератов, полученных с использованием чистого бакальского сидерита и чистого серпентинитомагнезита (рис. 5) показал, что основной связкой рудных зерен в агломерате с бакальским сидеритом является силикатная фаза с наличием в ней двухкальциевого силиката (рис. 5а), который оказывает, как известно, негативное влияние на прочностные показатели спека [6]. В агломерате с добавкой серпентинитомагнезита областей с силикатной связкой значительно меньше, оптически двукальциевый силикат светлее (рис. 5б), что позволяет сделать предположение об изомор-

фном замещении ионов кальция на ионы магния и стабилизации β-формы двухкальциевого силиката. Основной же связкой в агломерате с серпентинитомагнезитом является ферриты кальция (рис. 5 в)



а) *б)* *в)*

Рис. 5. Микроструктура агломерата, полученного с использованием бакальского сидерита (а) и серпентинитомагнезита (б, в) (отраженный свет, ×200)
1 — рудная фаза; 2 — силикатная связка; 3 — двухкальциевый силикат; 4 — ферриты

Таким образом, замена части бакальского сидерита серпентинитомагнезитом в пределах 5–10% позволяет существенно повысить выход годного агломерата при незначительном снижении скорости спекания и удельной производительности, его прочность на удар (+5) и истирание (-0,5). Дальнейшее увеличение доли серпентинитомагнезита в смеси (до 20% и более) ведет к резкому падению выхода годного из спека, снижению скорости спекания и удельной производительности по годному агломерату.

Первичный анализ микроструктуры агломерата с добавкой смеси сидерита и серпентинитомагнезита позволил предположить, что рост его прочностных характеристик может быть обусловлен двумя факторами: преобладанием ферритных фаз в структуре спека и кристаллохимической стабилизацией Ca_2SiO_4.

Список литературы

1. Овчинникова Е.В., Горбунов В.Б., Шаповалов А.Н. Оценка шлакового режима доменной плавки в условиях ОАО «Уральская Сталь» // Наука и производство Урала, 2015. № 11. С. 35–39.
2. Ключковский С.П., Смирнов А.Н., Савченко И.А. Разработка физико-химических основ комплексного использования высокомагнезиальных сидеритов // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова 2015. № 1. С. 26–31.
3. Шаповалов А.Н., Заводяный А.В., Братковский Е.В. Применение серпентинитомагнезитов Халиловского месторождения в агломерационном производстве // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2011. № 3. С. 25–29.
4. Матюхин В.И. Исследование особенностей обжига мелких фракций сидерита во вращающейся печи / В.И. Матюхин, С.Г. Меламуд, В.В. Шацилло, О.В. Матюхин, А.В. Матюхина // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2015. Том 58. №9. С. 652–657.
5. Martinez E. The effect of particle size on the thermal properties of serpentine minerals // The American mineralogist, 1961. Vol. 46, July — August. pp. 901–912.
6. Малышева Т.Я., Долицкая О.А. Петрография и минералогия железорудного сырья. — М.: МИСиС, 2004. — 422 с.

Д.Р. Ганин, А.А. Панычев, А.Н. Шаповалов,
Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»
В.Г. Дружков, МГТУ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА ВВЕДЕНИЕМ В ШИХТУ ДОБАВОК-АКТИВАТОРОВ В ВИДЕ ПУЛЬПЫ В ПРОЦЕССЕ ОКОМКОВАНИЯ

Известно большое количество технических и технологических решений, обеспечивающих повышение эффективности агломерационного производства. Однако их внедрение на действующих, зачастую морально устаревших аглофабриках, либо малоэффективно, либо сопряжено со значительными капитальными затратами. Одним из способов повышения эффективности аглопроцесса, не требующим значительных капитальных затрат и оказывающим комплексное воздействие на процесс подготовки аглошихты и ход спекания, является использование в аглошихте минеральных добавок, улучшающих окомкование и способствующих активизации процессов минералообразования при спекании.

В условиях работы аглоцеха АО «Уральская Сталь» актуально вовлечение в процесс производства местного минерального сырья, увеличение потребления которого снизило бы сырьевые, транспортные и экологические издержки предприятия. Поэтому в качестве минеральных добавок для АО «Уральская Сталь» целесообразно использовать ресурсы Восточного Оренбуржья: бурожелезняковые руды Орско-Халиловской группы месторождений (отвальная мелочь Новокиевского месторождения, руды Новопетропавловского и Аккермановского месторождений); бентонитовые глины Воскресенского и Новокиевского месторождений, серпентинитомагнезиты Халиловского месторождения [1–3].

Из всего разнообразия бурожелезняковых руд Орско-Халиловской группы месторождений в работе исследовалось влияние на показате-

ли аглопроцесса добавок пылевидных отходов переработки руд Новокиевского месторождения, в отвалах которого находятся отсевы дробильно-сортировочной фабрики, содержащие около 3,6 млн. т рудной мелочи и занимающие территорию в 20 га [4, 5]. В настоящее время бурожелезняковые руды Орско-Халиловской группы месторождений не используются в производстве агломерата из-за пониженного содержания железа и сложности обогащения, высокой теплопотребности аглошихты при их агломерации, получения пористого малопрочного агломерата [4, 5]. Однако их минералогический состав, содержащий железосодержащие минералы: гидрогётит, лимонит, гидрогематит, железистые хлориты может влиять на активизацию процессов окомкования и спекания при использовании руды в виде добавки [1, 2].

В качестве добавки бентонита исследовалось влияние на показатели аглопроцесса бентонитовых глин Воскресенского месторождения, расположенного в Гайском районе Оренбургской области, относящихся к щёлочноземельным кальциево-магниевым и содержащим до 65% монтмориллонита [6]. С целью более эффективного применения глин их активировали кальцинированной содой, повышая бентонитовое число до 50–60 см^3 (по ГОСТ 21282-93) и набухаемость в 10–12 раз [6]. При использовании добавок бентонитовых глин Воскресенского месторождения, обладающих большой удельной поверхностью и повышенной сорбционной ёмкостью, можно ожидать увеличения прочности гранул окомкованной шихты, скорости её спекания, а также прочности агломерата за счёт более равномерного теплового состояния спекаемого слоя.

В качестве добавки серпентинитомагнезита исследовалось влияние на показатели аглопроцесса серпентинитомагнезитов Халиловского месторождения [7], содержащих до 40 % MgO, которые можно рассматривать как упрочняющую магнезиальную добавку. Ограничением по их использованию является содержание хрома, поэтому расход серпентинитомагнезита не должен превышать 50 кг/т агломерата.

В связи с тем, что в аглопроизводстве эффективность использования небольших добавок в аглошихту (до 1,0–1,5 %) ограничивается широким диапазоном крупности её компонентов (0–10 мм), а также недостаточным временем смешивания, особенно в условиях аглоцеха АО «Уральская Сталь», то рациональнее подавать добавки с водой в виде пульпы при увлажнении аглошихты в процессе её окомкования [8–10]. В связи с этим в работе исследовалось влияние на показатели аглопроцесса добавок пылевидных отходов переработки руд Новокиевского месторождения, бентонитовых глин Воскресенского месторождения и серпентинитомагнезитов Халиловского месторождения, вводимых в шихту с водой в виде пульпы при окомковании.

При проведении исследования за начальный (базовый) период были приняты усреднённые условия и показатели работы аглоцеха АО «Уральская Сталь» в зимнее время (с ноября по апрель) за 5 лет. В состав аглошихты входили аглоруда Бакальского рудоуправления (БРУ) и концентрат «доменный» (смесь аглоруды и концентрата Михайловского горнообогатительного комбината (МГОК) в соотношении 1:3). Из состава шихты, с целью обеспечения стабильных условий проведения экспериментов, были исключены: окалина, отсев брикетов, металлоконцентрат (продукт магнитной сепарации металлургических шлаков), колошниковая пыль, шлам участка обезвоживания. В связи с непостоянством степени обжига известь была заменена известняком Аккермановского месторождения. Отсев агломерата и окатышей был заменён возвратом (агломератом от предыдущих спеканий крупностью 0–5 мм). Содержание возврата в аглошихте составляло 25 % от массы сухой железорудной смеси (ЖРС), перешедшей в агломерат. При подготовке агошихты производился отсев фракций аглоруды (+10 мм), известняка (+3 мм), коксика (+3 мм). Характеристики аглошихты приведены в табл. 1 и 2.

В качестве исходных данных для расчёта аглошихты использовали содержание углерода в шихте 4,2 %; содержание MgO в агломерате 2,0 %, основность агломерата по отношению CaO/SiO_2 = 1,5 ед. Количество бурого железняка и серпентинитомагнезита (крупностью 0–0,063 мм), вводимых с пульпой в аглошихту при окомковании, составляло по опытам, %: 0; 0,5; 1,0; 1,5, а количество бентонита (крупностью 0–0,063 мм, %: 0; 0,5; 1,0 (от массы сухой ЖРС без учёта сидерита БРУ и возврата).

Подготовка аглошихты к спеканию производилась в смесителе-окомкователе диаметром 0,6 м при n = 9 об/мин. Время обработки шихты в барабане включало: смешивание шихты (2,5 мин); смешивание шихты с её увлажнением до 3–4 % пневмораспылением воды (2,5 мин); окомкование шихты с её

увлажнением до 6–8% пневмораспылением пульпы (2,5 мин); окомкование шихты без её увлажнения (2,5 мин). Для определения влажности, насыпной плотности, гранулометрического состава шихты после каждой стадии её подготовки производился отбор проб шихты с последующим их рассевом на ситах, определением фракционного состава и среднего эквивалентного (среднемассового) диаметра.

Таблица 1. Физико-химические свойства компонентов аглошихты

Наименование вида сырья	Влажность, %	Насыпная плотность, т/м³	Содержание фракции, %				п.п.п., %
			5–10 мм	3–5 мм	1–3 мм	0–1 мм	
аглоруда БРУ	1,5	1,75	17,7	17,4	37,4	27,5	34,53
концентрат МГОКа (доменный)	3,0	2,05	4,35	3,2	3,92	88,53	0,5
известняк	0,5	1,6	–	–	45,7	54,3	42,05
возврат	0	1,75	–	47,7	45,60	6,7	0,5
коксовая мелочь	10	0,5	–	–	53,9	46,1	–
бурый железняк	4,3	1,7	–	–	–	100	14,1
бентонит	5,72	0,93	–	–	–	100	12,5
серпентинито-магнезит	1,61	2,05	–	–	–	100	16,2

Таблица 2. Химический состав материалов аглошихты

Наименование вида сырья	Химический состав сухих материалов, %												
	Fe	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	MnO	S	P_2O_5	TiO_2	Na_2O	K_2O
аглоруда БРУ	29,8	31,4	7,68	11,0	4,22	1,9	10,00	0,93	0,17	0,057	0,12	0,12	0,42
концентрат МГОКа (доменный)	62,2	19,6	67,2	10,6	0,78	0,29	0,48	0,02	0,067	0,033	0,034	0,11	0,11
известняк	1,3	–	1,84	0,9	53,8	0,19	0,65	–	0,012	0,046	–	0,1	0,03
возврат	51,82	11,69	61,04	9,19	14,70	0,86	2,0	0,14	0,046	0,042	0,039	0,12	0,12
бурый железняк	34,8	–	49,7	19,3	2,1	8,1	2,5	–	–	0,39	0,26	–	–
бентонит	5,43	0,51	7,75	44,1	1,24	15,34	1,88	0,1	0,036	0,064	0,1	–	–
серпентинитомагнезит	5,02	–	7,17	27,2	1,68	1,0	33,3	0,12	0,03	0,16	–	–	–
твёрдое топливо	Углерод — 84,0 %. Зола — 13, 0 %. Сера — 0,5 %.												
коксовая мелочь: зола коксика	8,51	–	12,16	46,0	7,4	15,0	3,15	0,72	1,36	–	–	–	–

Для определения прочности гранул окомкованной аглошихты на сжатие отбирали пробу массой 1 кг, выделяли из неё рассевом класс крупности 5–10 мм, из которого отбирали 60 гранул с формой, наиболее близкой к сферической. Прочность гранул определяли с помощью установки для определения прочности гранул окомкованной аглошихты одноосным сжатием между неподвижной подложкой и движущимся ей навстречу поршнем, поверхности которых параллельны. Гранулы по одной помещали на подложку установки (поверхность электронных весов) и создавали постоянно возрастающую нагрузку до их разрушения, после чего рассчитывали среднюю прочность гранул на сжатие (Н/гранула) в опыте.

Спекания проводили на аглочаше диаметром 210 мм (постелью служил возврат крупностью 5–10 мм, массой 2 кг) при среднем разрежении 6 кПа. По завершению спекания определяли выход годного агломерата (+5 мм), который в дальнейшем подвергался стабилизации трёхкратным сбрасыванием с определением по ГОСТ 25471-82 прочности на сбрасывание. Годный агломерат крупностью

Таблица 3. Условия и усреднённые результаты экспериментов

Параметры	Доля добавки с пульпой (в % от массы сухой ЖРС без учёта сидерита БРУ и возврата)								
	база	бурый железняк			бентонит		серпентинитомагнезит		
	0%	0,5%	1,0%	1,5%	0,5%	1,0%	0,5%	1,0%	1,5%
Расход добавки, кг/т	0	4,0	8,0	12,0	4,24	8,48	3,94	7,98	12,13
CaO/SiO_2 (расч.), ед.	1,5								
MgO в агломерате (расч.), %	2,0								
$Fe_{общ}$ в агломерате (расч.), %	51,46	51,38	51,30	51,22	51,20	50,96	51,45	51,44	51,43
Содержание углерода топлива в аглошихте, %	4,2								
Расход шихты, кг/т:	134,23	133,40	132,57	131,73	133,55	132,91	120,64	106,69	92,38
аглоруда БРУ	788,87	785,67	782,45	779,24	784,48	779,55	795,07	801,43	807,96
концентрат МГОКа (доменный)	252,53	252,53	252,53	252,53	252,53	252,53	252,53	252,53	252,53
возврат	246,89	247,83	248,78	249,72	250,35	253,67	248,24	249,64	251,06
известняк	62,60	62,64	62,67	62,70	62,68	62,76	62,46	62,32	62,17
коксик									
Влажность аглошихты, %	7,20	7,0	6,8	7,0	6,53	6,58	6,83	6,55	6,45
Содержание фр. 0–1 мм в шихте после окомкования, %	14,76	8,76	5,06	4,18	10,79	10,60	11,22	9,44	7,57
Прочность на сжатие окомкованной аглошихты, Н/гранула	2,6	2,89	3,16	3,39	2,9	3,2	2,64	3,43	3,99
Высота слоя, мм	329,2	327,0	322,3	326,7	331,67	333,00	330,66	328,00	330,00
Скорость спекания, мм/мин	13,54	14,22	15,82	16,23	13,70	13,91	14,10	16,10	18,40
Выход годного из спёка, %	65,27	66,79	67,61	68,51	70,68	71,87	68,88	69,53	69,50
Прочность на сбрасывание, %	83,59	84,34	84,90	86,39	85,92	86,59	85,32	85,71	86,39
Прочность на удар, %	62,95	66,57	69,94	73,13	67,93	68,71	69,77	71,69	77,00
Сопротивление истиранию, %	5,80	5,19	5,37	5,29	5,46	5,17	5,68	5,57	4,87
Производительность по годному агломерату, т/(м^2·ч)	0,852	0,898	1,013	1,053	0,94	1,00	0,9	0,99	1,07
$Fe_{общ}$ в агломерате (факт.), %	52,08	51,43	51,40	51,20	52,07	51,88	52,00	52,40	52,53
FeO в агломерате (факт.), %	14,27	13,50	13,98	13,17	13,87	14,12	12,96	13,62	13,45
CaO/SiO_2 (факт.), ед.	1,51	1,45	1,50	1,47	1,44	1,52	1,55	1,56	1,51
MgOв агломерате (факт.), %	1,98	2,02	2,05	1,95	1,90	1,89	1,97	1,94	1,98

5–40 мм после сбрасывания подвергался барабанному испытанию по ГОСТ 15137-77 с определением прочности на удар и сопротивления истиранию. Также отбирались пробы для определения химического и минералогического состава агломерата. Кроме вышеуказанных параметров, по окончании каждого спекания рассчитывались вертикальная скорость спекания и удельная производительность установки по годному агломерату. Условия и усреднённые результаты экспериментов (каждый опыт повторялся не менее 3 раз) представлены в табл. 3.

Полученные данные позволяют сделать выводы о влиянии исследуемых добавок на эффективность подготовки аглошихты, результаты её спекания и качество агломерата.

На рис. 1 представлены зависимости содержания в аглошихтах мелочи фракции 0–1 мм от расхода добавок, вводимых с пульпой при окомковании. С ростом расхода добавок содержание фракций 0–1 мм в аглошихтах снижается, а эффект от использования добавок монотонно убывает. Обращает на себя внимание сравнительно низкая эффективность добавки бентонита, особенно, по сравнению с бурым железняком. Это можно объяснить специфическими условиями введения бентонита, подаваемого в шихту в виде пульпы, где происходит его набухание и дальнейший эффект снижается.

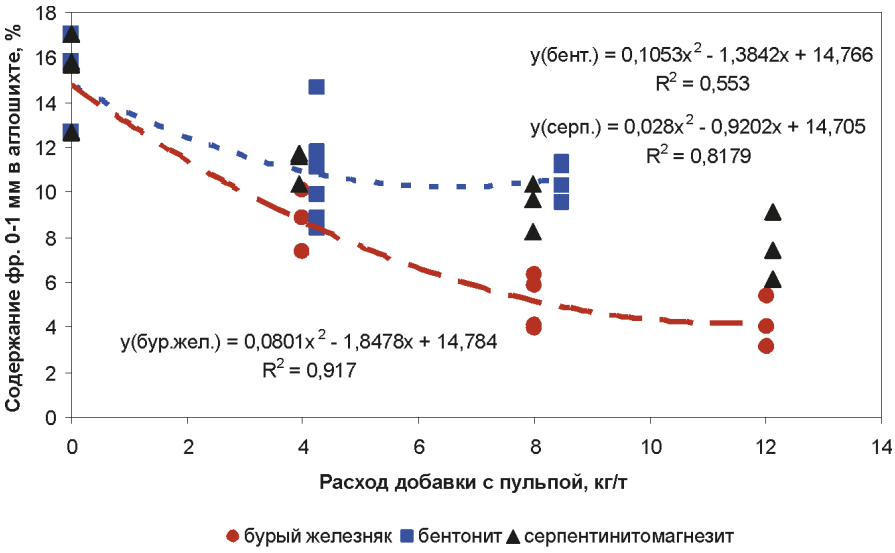


Рис. 1. Зависимости содержаний фракции 0–1 мм в аглошихте от расхода добавок, вводимых с пульпой при окомковании

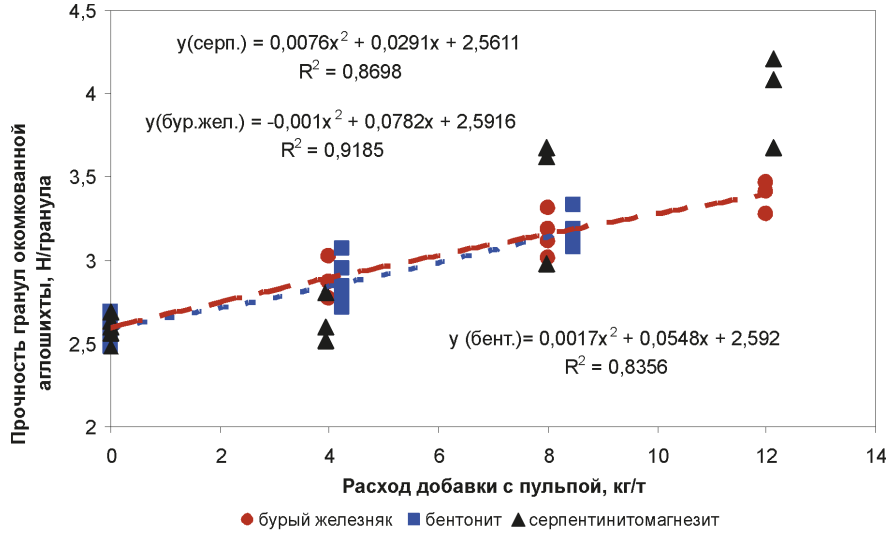


Рис. 2. Зависимости прочности гранул окомкованной аглошихты от расхода добавок, вводимых с пульпой при окомковании

С увеличением расхода добавок увеличивается прочность гранул окомкованной аглошихты, что снижает разупрочнение их при перегрузках, а также уменьшает потери газодинамического напора при спекании (рис. 2). Причём, наибольший упрочняющий эффект проявляется при использовании добавок серпентинитомагнезита с расходом 8–12 кг/т.

Улучшение фракционного состава аглошихты (особенно в результате снижения содержания в аглошихте мелочи фракции 0–1 мм) и прочности гранул обеспечивает лучшую газопроницаемость спекаемого слоя, что проявляется в увеличении вертикальной скорости спекания шихты (рис. 3).

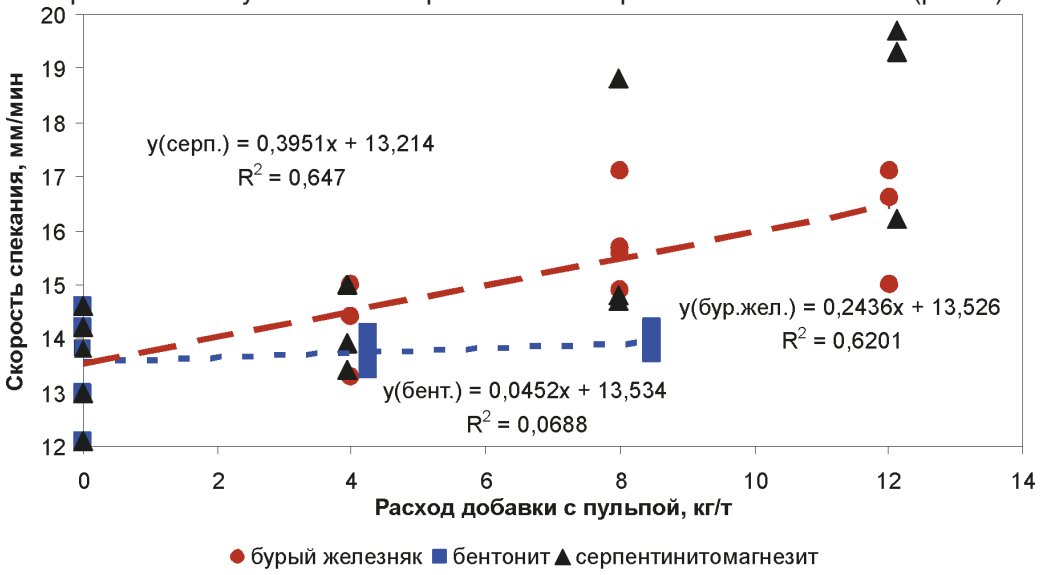


Рис. 3. Зависимости вертикальной скорости спекания аглошихты от расхода добавок, вводимых с пульпой при окомковании

Выход годного агломерата из спёка с ростом расхода добавок увеличивается в связи со стабилизацией тепловых условий формирования аглоспёка (рис. 4). Кроме того, нельзя исключить влияние добавок (находящихся на поверхности гранул аглошихты) на ускорение процессов минералообразования. Это обеспечивает более раннее и полное вовлечение аглошихты в процесс спекания.

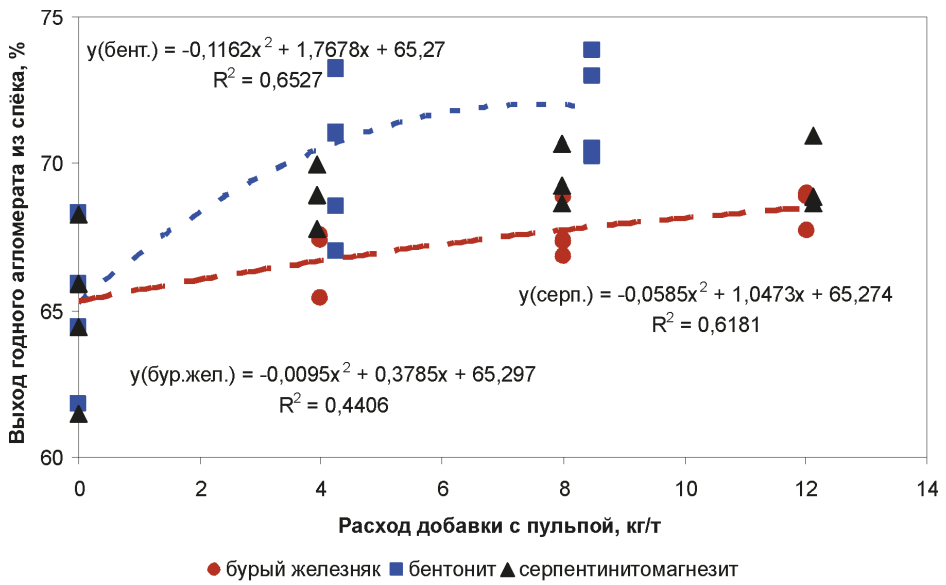


Рис. 4. Зависимости выхода годного агломерата из спёка от расхода добавок, вводимых с пульпой при окомковании

В свою очередь, увеличение вертикальной скорости спекания аглошихты и увеличение выхода годного агломерата из спёка обеспечивает рост удельной производительности аглоустановки с увеличением расхода добавок (рис. 5).

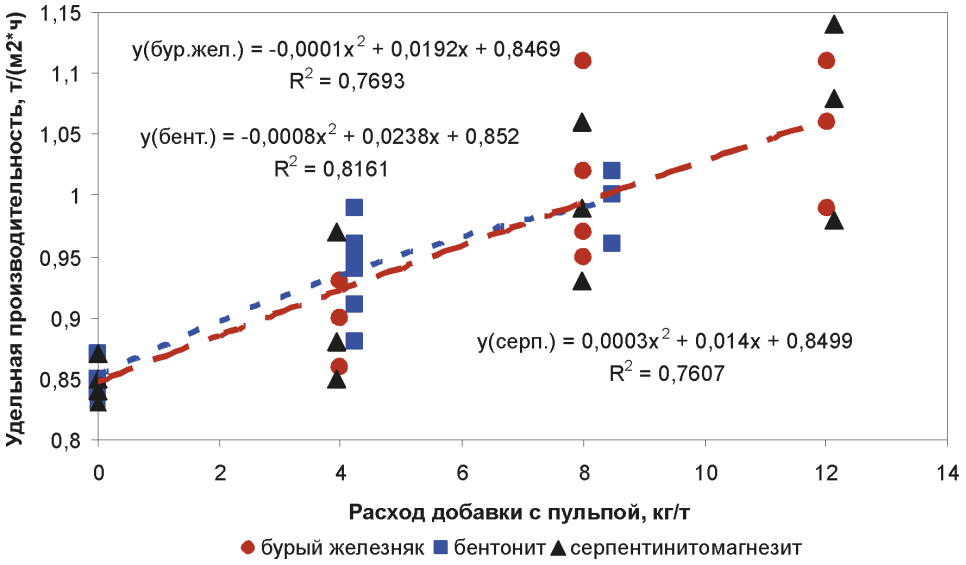


Рис. 5. Зависимости удельной производительности агломерационной установки от расхода добавок, вводимых с пульпой при окомковании

Прочность агломерата на сбрасывание с ростом расхода добавок увеличивается (рис. 6), что происходит в результате повышения однородности фракционного состава аглошихты и стабилизации тепловых условий её спекания, которые обеспечивают более однородное протекание процессов агломерации в спёке.

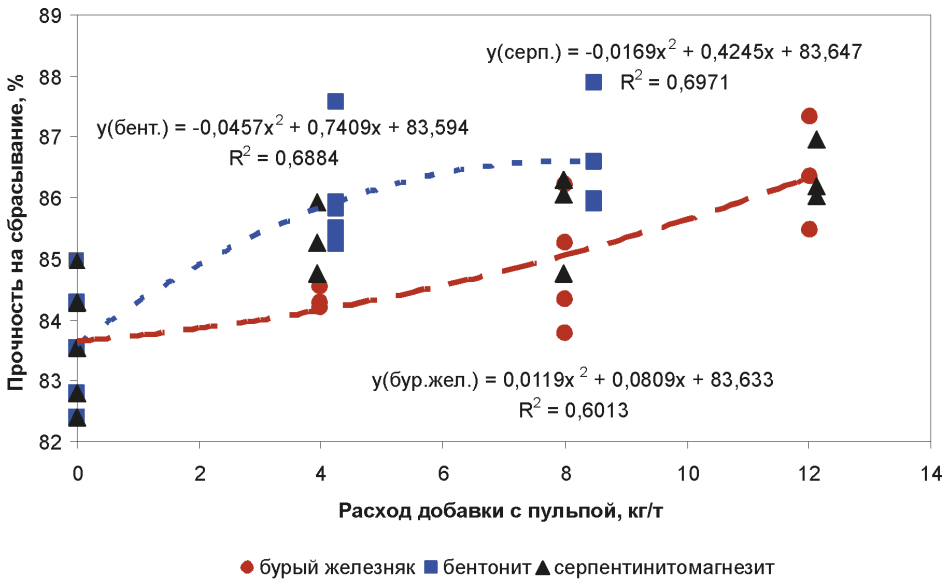


Рис. 6. Зависимости прочности на сбрасывание агломерата от расхода добавок, вводимых с пульпой при окомковании

Прочность агломерата на удар (доля фракции 5–40 мм) с ростом расхода добавок: для бурого железняка и серпентинитомагнезита увеличивается, а для бентонита увеличение прочности на удар наблюдается только до расхода около 4 кг/т (рис. 7).

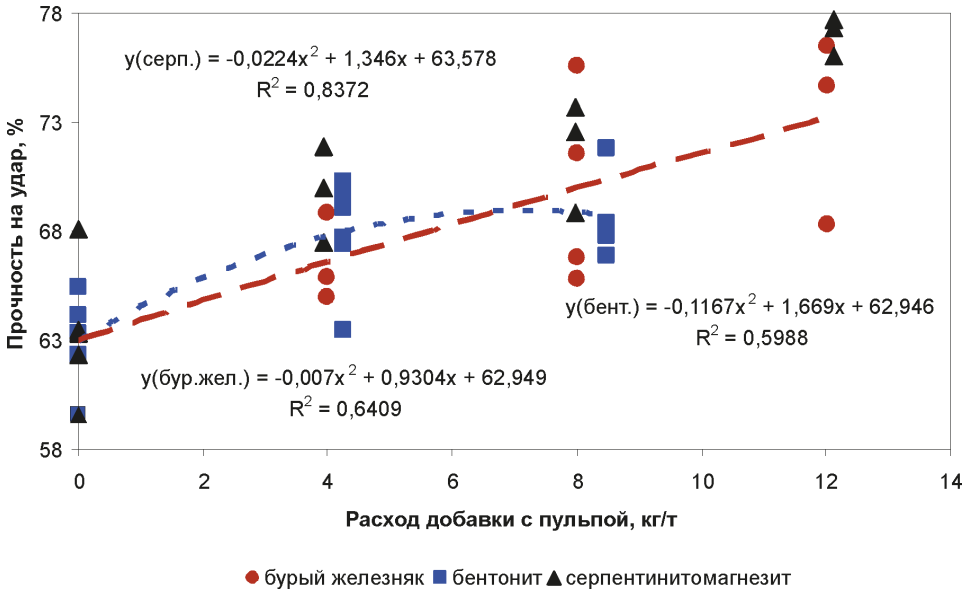


Рис. 7. Зависимости прочности на удар агломерата от расхода добавок, вводимых с пульпой при окомковании

Сопротивление истиранию агломерата (доля фракции 0–0,5 мм), согласно линиям тренда, с ростом расхода добавок: для бентонита и серпентинитомагнезита снижается, а для бурого железняка снижение сопротивления истиранию наблюдается только до расхода около 8 кг/т (рис. 8).

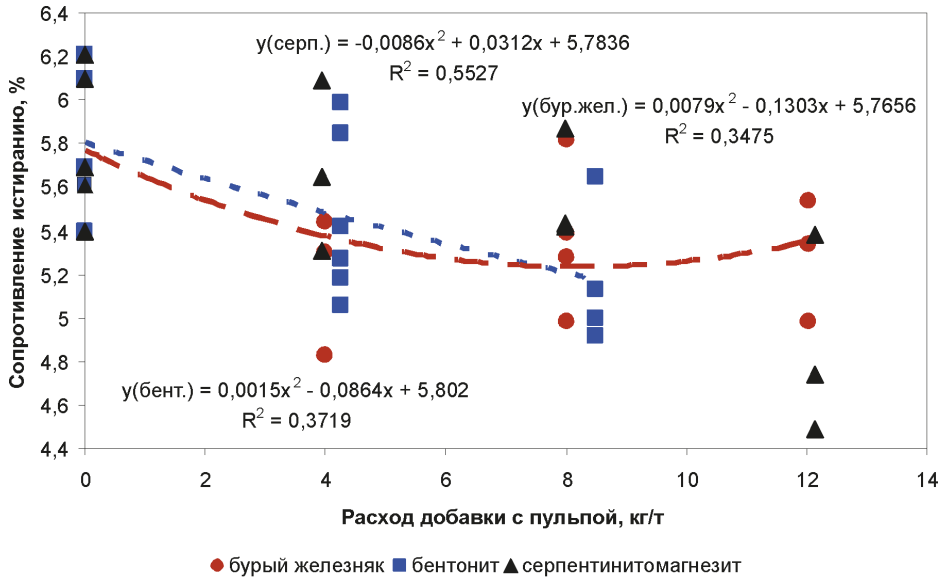


Рис. 8. Зависимости сопротивления истиранию агломерата от расхода добавок, вводимых с пульпой при окомковании

Отмеченное в работе влияние изучаемых добавок проявляется не только через улучшение результатов окомкования и стабилизацию тепловых условий спекания, но и в их участии в процессах минералообразования. Этому способствует активизация добавок при их измельчении и нанесении на поверхность гранул при окомковании. Указанные процессы требуют дальнейшего изучения.

Список литературы

1. Возможности совершенствования технологии производства агломерата в ОАО «Уральская Сталь» / Д.Р. Ганин, В.Г. Дружков, А.А. Панычев, А.Н. Шаповалов // Металлургия, технологии, инновации, качество: труды XIX международной научно-практической конференции / под ред. Е.В. Протопопова. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2015. Ч. 1. С. 98–102.
2. Пути использования местных минеральных ресурсов в агломерационном производстве АО «Уральская Сталь» / Д.Р. Ганин, В.Г. Дружков, А.А. Панычев, А.Н. Шаповалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 1. С. 34–40.
3. Применение минеральных добавок из сырья месторождений Восточного Оренбуржья в агломерационном производстве / Д.Р. Ганин, В.Г. Дружков, А.А. Панычев, А.Н. Шаповалов // Актуальные проблемы современной науки, техники и оборудования: материалы 74-й международной научно-технической конференции / под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. Т. 1. С. 46–48.
4. Панычев А.А. Исследования обогащения природно-легированного сырья для производства нефтегазовых труб в северном исполнении. — М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2001. — 112 с.
5. Дружков В.Г., Заводяный А.В. Совершенствование технологии агломерации бурых железняков Орско-Халиловского района. — Магнитогорск: изд-во ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2010. — 156 с.
6. Шаповалов А.Н., Заводяный А.В. Использование бентонитовых глин Воскресенского месторождения для производства железорудных окатышей // Металлург. 2014. № 5. С. 40–43.
7. Шаповалов А.Н., Заводяный А.В., Братковский Е.В. Применение серпентинитомагнезитов Халиловского месторождения в агломерационном производстве // Известия вузов. Чёрная металлургия. 2011. № 3. С. 25-29.
8. Патент 2471005 РФ, МПК C22B 1/16. Способ агломерации железорудных материалов / А.А. Панычев, Д.Р. Ганин, А.П. Никонова. Заявл. 11.05.2011. Опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36.
9. Заявка на изобретение 2016118171 РФ, МПК C22B 1/16. Способ агломерации железорудных материалов / Д.Р. Ганин, В.Г. Дружков, А.А. Панычев, А.Н. Шаповалов. Заявл. 10.05.2016.
10. Заявка на изобретение 2016122289 РФ, МПК C22B 1/16. Способ агломерации железорудных материалов / Д.Р. Ганин, В.Г. Дружков, А.А. Панычев, А.Н. Шаповалов. Заявл. 03.06.2016.

В.А. Сергатов, В.М. Давидченко,
ООО «Фирма Системосервис»
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»

ГОРЕЛКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В АГЛО-ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Совместное предприятие ООО «Фирма Системосервис» г. Кривой Рог и ООО Фирма «ТАЛС-1» г. Москва работают над проблемами эффективного и рационального использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) с 2005 года.

Наилучших показателей в совместной работе достигли в конструировании горелочных устройств нового поколения в металлургии, позволяющих значительно экономить топливо, работающих как на природном газе, так и на газовых смесях в различных теплотехнических агрегатах с единичной мощностью от 0,01 до 140 МВт.

В основе работы горелочных устройств нашей конструкции нового поколения заложен новый способ сжигания топлива «ноу-хау». Определяющим в новом способе сжигания топлива является специальное рекуперативное газовое сопло, обеспечивающее равномерное распределение топлива (горючего газа) в потоке, подаваемого для горения, воздуха, и обеспечивающее частичную инжекцию и рециркуляцию высокотемпературной газо-воздушной смеси — продуктов неполного сгорания из горелочного тоннеля по оси горелки в противоход общему движению факела пламени.

Данные процессы приводят к увеличению калориметрической температуры при сжигании природного, коксового газов и их смесей, что в конечном итоге приводит к экономии топлива.

Отличительными особенностями горелочных устройств являются:

1. Эффективная их работа на природном газе, коксовом газе и газовых смесях с $Q_{н}^{р}$ = 2000–2500 ккал/нм^3.
2. Возможное эффективное использование в работе горелки двух видов топлива, имеющих свои газовые сопла, как совместно, так и отдельно.

3. Газовое сопло, рекуперативная насадка носика горелки выполнены из жаропрочной стали. Кроме того, рекуперативная насадка охлаждается воздухом, что повышает срок эксплуатации горелки.
4. Экологически менее опасны, т.к. образование CO и NO_x значительно меньше нормы, чем при использовании известных серийных горелочных устройств (с одной и той же тепловой мощностью) из-за возможности ведения процесса полного сгорания топлива при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 0{,}9 \div 1{,}1$.
5. Энергосберегающие.
6. Надежны и просты в эксплуатации, не требуют специального регулирования и настроек.
7. Возможность получения необходимой длины и формы факела пламени (в зависимости от требований технологии), учитывая угол встречи потока (потоков) газовых струй и воздуха в самой горелке.
8. Быстрая окупаемость: 0,5–2 года (в зависимости от мощности горелочного устройства).

Новый способ сжигания топлива разработан, испытан и внедрен в производство.

Горелочные устройства нового поколения установлены и успешно работают:

- на вращающихся печах №№ 1–5 огнеупорно-известкового цеха ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» — с 2010 года.
- на установке для подогрева «грязного» агломерационного газа в газопроводе ∅ 2820 перед секциями рукавных фильтров ФРИР-7700 сухой газоочистки агломерационной машины БОАФ ПАО «ОГОК», г. Орджоникидзе — с 2015 года.
- на агломашинах ПАО «Запорожсталь» — с 2016 года.
- на установке по удалению настылей в чугуновозных ковшах ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» — с 2013 года.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ГРИ.Р-3500-2, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ №№ 1–5 ОГНЕУПОРНО-ИЗВЕСТКОВОГО ЦЕХА ПАО «АРСЕЛОРМИТТАЛ КРИВОЙ РОГ»

Конструкция горелочного устройства ГРИ.Р-3500-2 включает в себя горелку основную (Рис. 1) и горелку запальную (Рис. 2).

Горелка основная представляет собой двухпроводную горелку среднего давления, в которой природный газ подается по 2-м каналам:

- центральной газовой трубе и далее по центральному (основному) газовому соплу;
- периферийной газовой трубе, на которой установлено регулируемое периферийное газовое сопло.

Первичный холодный вентиляторный воздух, поступающий в горелку, предназначен для ее охлаждения.

Сжатый воздух используется в случае прекращения подачи вентиляторного воздуха (аварийная остановка вентилятора) для охлаждения горелки.

Горелка основная представлена на Рис. 1 и состоит из следующих основных элементов:

1. Труба воздушная (поз. 1).
2. Труба газовая периферийная (поз. 2).
3. Труба газовая центральная (поз. 3).
4. Сопло газовое центральное (поз. 4).
5. Сопло газовое периферийное (поз. 5).
6. Камеры предварительного смешивания (поз. 6).
7. Канал для возможной подачи вторичных видов топлива (поз. 7).
8. Труба-гляделка (поз. 8).
9. Регулирующий механизм (поз. 9).

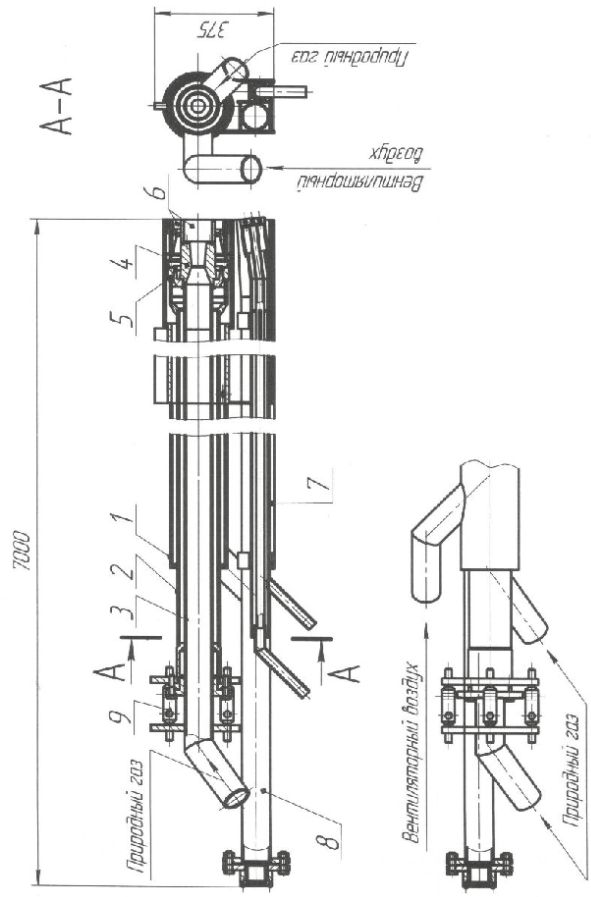


Рис. 1. Горелка основная

Природный газ подается по двум патрубкам газовым — в трубу центральную газовую и далее в сопло газовое центральное и в трубу периферийную газовую и далее в регулируемое сопло газовое периферийное.

Сопло газовое центральное предназначено для организации длинного факела пламени, направленного непосредственно вдоль нагреваемой поверхности известняка.

Сопло газовое периферийное предназначено для организации короткого светящегося факела пламени. Проходное газовое сечение сопла периферийного может регулироваться при помощи регулирующего механизма трубы газовой центральной. Сопло газовое периферийное имеет отверстия, предназначенные изначально для сушки и разогрева печи и далее для организации короткого факела пламени.

Камера предварительного смешивания предназначена для перемешивания первичного охлаждающего вентиляторного воздуха горелки и природного газа, поступающего через сопло газовое центральное и сопло газовое периферийное.

Труба воздушная диаметром является несущим кожухом горелки, в которую подается воздух от общей подачи вентиляторного холодного воздуха во вращающуюся печь.

Горелка запальная Рис. 2 представляет собой одноканальную горелку среднего давления и предназначена для подачи первичного газа для сушки и разогрева футеровки вращающейся печи с расходом газа от 0 до 350 нм^3/ч. Горелка запальная зажигается от запального электрода системы пуска и зажигания газа, установленной в специальном шкафу управления.

При температуре в зоне обжига печи не менее 800–900 °С подается газ через центральное сопло горелки основной.

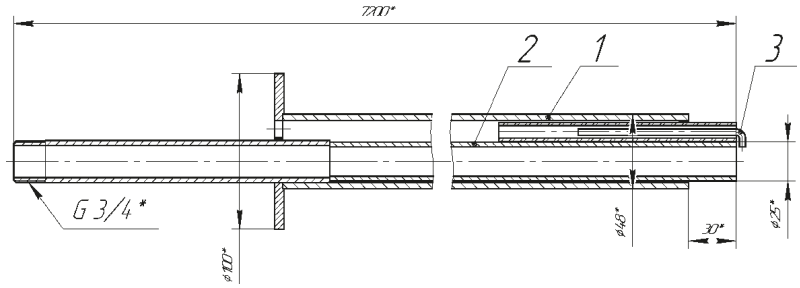


Рис. 2. Горелка запальная

Горелка запальная представлена на Рис. 2 и состоит из следующих основных элементов:

1. Корпус (поз. 1)
2. Труба газовая (поз. 2)
3. Запальный электрод (поз. 3)
4. Шкаф управления (рис. 5).
5. Клапан электромагнитный VGP 15R02W6.
6. Кран шаровый.

Установка горелок на вращающихся печах огнеупорно-известкового цеха

Горелки ГРИ.Р — 3500, установленные в 2010 году на вращающихся печах ОИЦ ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», позволили уменьшить расход природного газа на 10% по сравнению с 2009 годом

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ГНП.Р-250-30, УСТАНОВЛЕННЫХ НА УСТАНОВКЕ ДЛЯ ПОДОГРЕВА «ГРЯЗНОГО» АГЛОМЕРАЦИОННОГО ГАЗА В ГАЗОПРОВОДЕ ∅ 2820 ПЕРЕД СЕКЦИЯМИ РУКАВНЫХ ФИЛЬТРОВ ФРИР-7700 СУХОЙ ГАЗООЧИСТКИ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ МАШИНЫ БОАФ ПАО «ОГОК»

Горелка ГНП.Р-250-30 (Рис. 3) — многосопловая рекуперативная газовая горелка с принудительной подачей природного газа и воздуха, предназначена для подогрева «грязного» агломерационного газа в дымопроводе ∅ 2820 перед секциями рукавных фильтров ФРИР-7700 сухой газоочистки агломерационной машины БОАФ ПАО «ОГОК».

Параметры агломерационного газа:

Среда — «грязный» агломерационный газ,

Содержание пыли — до 3,2 г/м^3;

Содержание влаги — до 90%;

Разрежение газа в газопроводе ∅ 2820 мм — до 11500 Па.

Расход агломерационного газа — 350÷470 тыс. нм^3/ч. (470 тыс. нм^3/ч — исходя из характеристики существующего эксгаустера).

Возможная температура агломерационного газа во время пуска в работу агломерационной машины равна температуре окружающего воздуха:

в зимнее время до –10°С, в летнее время + 27°С.

В зависимости от температуры окружающей среды и количества дымовых газов, могут быть использованы одна или две идентичные горелки (ГНП.Р-250-30 №1, ГНП.Р-250-30 № 2).

Горелки ГНП.Р-250-30 №№ 1, 2 с оборудованием КИПиА, с газо-, воздухоподводящей системой, запорно-регулирующей арматурой, измерительными узлами, клапанами безопасности, представляют собой Установку, предназначенную для подогрева «грязного» агломерационного газа в автоматическом режиме до температуры +80°С (выше температуры точки росы на 24°С) в дымопроводе ∅ 2820 перед секциями рукавных фильтров ФРИР-7700 сухой газоочистки агломерационной машины с целью исключения образования конденсата влаги на тканевых рукавах, налипания пыли на поверхности рукавов, обеспечения их нормальной эксплуатации в условиях низких температур окружающей среды во время пуска агломашины в работу и увеличения срока службы фильтров.

Работа горелки (горелок) предусмотрена в автоматическом режиме.
Работа горелки в ручном режиме предусмотрена при проведении пуско-наладочных работ.

УСТАНОВКА ДЛЯ ПОДОГРЕВА «ГРЯЗНОГО» АГЛОМЕРАЦИОННОГО ГАЗА. ОПИСАНИЕ

Установка включает в себя 2 горелки ГНП.Р-250-30 №№ 1, 2 каждая из которых оборудована своей автоматикой и вентилятором ВЦ 14-46-5,0.

На каждую горелку предусмотрена индивидуальная подача природного газа с запорно-регулирующей арматурой и индивидуальная подача воздуха от вентилятора ВЦ 14-46-5,0.

В Установке в зависимости от температуры окружающей среды и количества агломерационных дымовых газов могут быть использованы одна или две горелки.

Работа горелки (горелок) предусмотрена в автоматическом режиме.

Подогрев агломерационного газа до +80°С осуществляется за счет ввода непосредственно в газопровод «грязного» агломерационного газа ∅ 2820 мм горячих продуктов сгорания природного газа в камерах горения горелочного устройства одного или 2-х горелочных устройств, в зависимости от температуры окружающей среды и количества агломерационных дымовых газов.

Общий вид горелки

Устройство горелки ГНП.Р-250-30

Горелка ГНП.Р-250-30 (Рис. 3) состоит из следующих основных элементов:

1. Корпус горелки (поз. 1)
2. Рекуперативная насадка (теплообменник) — камера вторичного горения (поз. 2)
3. Дымовая труба (поз. 3)
4. Стол опорный (поз. 4)
5. Камера первичного горения (поз. 5)
6. Патрубок газовый (поз. 6)
7. Коллектор газовый (поз. 7)
8. Кран шаровый газовый центрального газового сопла Ду65 (поз. 8)
9. Сопло газовое основное (поз. 9)
10. Сопло газовое центральное (поз. 10)
11. Патрубок воздушный (поз. 11)
12. Кран шаровый воздушный Ду100 (поз. 12) охлаждения рекуперативной насадки и дымовой трубы горелки
13. Сопло воздушное (поз. 13)
14. Камера вторичного горения (поз. 14)
15. Стабилизатор горения (поз. 15)
16. Футеровка жароупорная (поз. 16)
17. Компенсатор линзовый (поз. 17)
18. Патрубки для отбора проб дымовых газов, визуального контроля горения (поз.18)
19. Труба-гляделка (поз. 19)
20. Датчик контроля пламени (поз. 20)
21. Запальная горелка ZMI25B600 (поз.21)
22. Люк ∅ 1020 газопровода ∅ 2820 агломерационной фабрики (поз. 22)

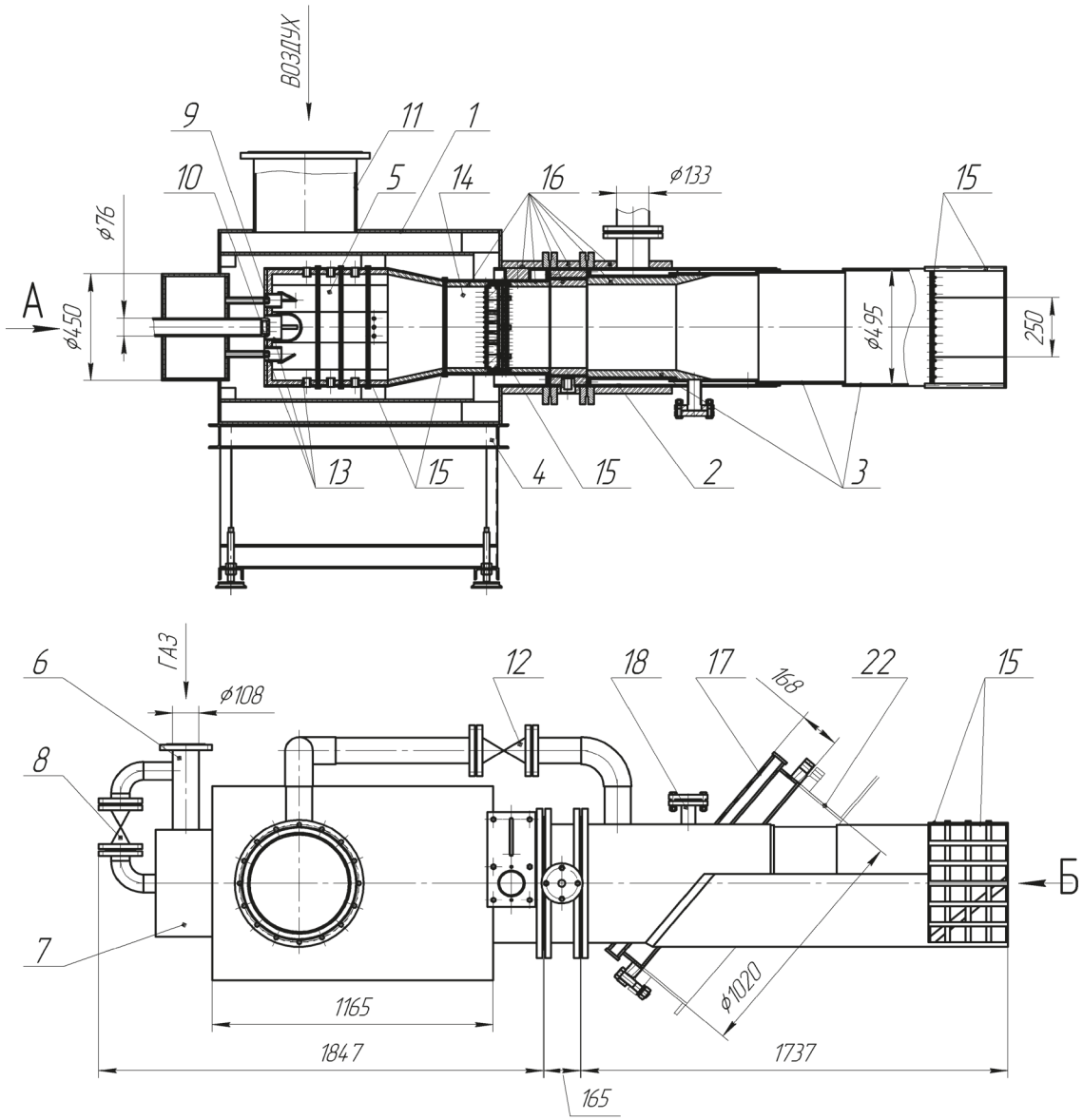


Рис. 3. Горелка газовая ГНП.Р-250-30

Основные габаритные размеры горелки:

- длина горелки, мм 3755
- диаметр горелки, мм 820
- масса горелки, кг 1310

Принцип работы горелки ГНП.Р-250-30

В конструкции горелки ГНП.Р-250-30 предусмотрены две подачи природного газа и две подачи вентиляторного воздуха.

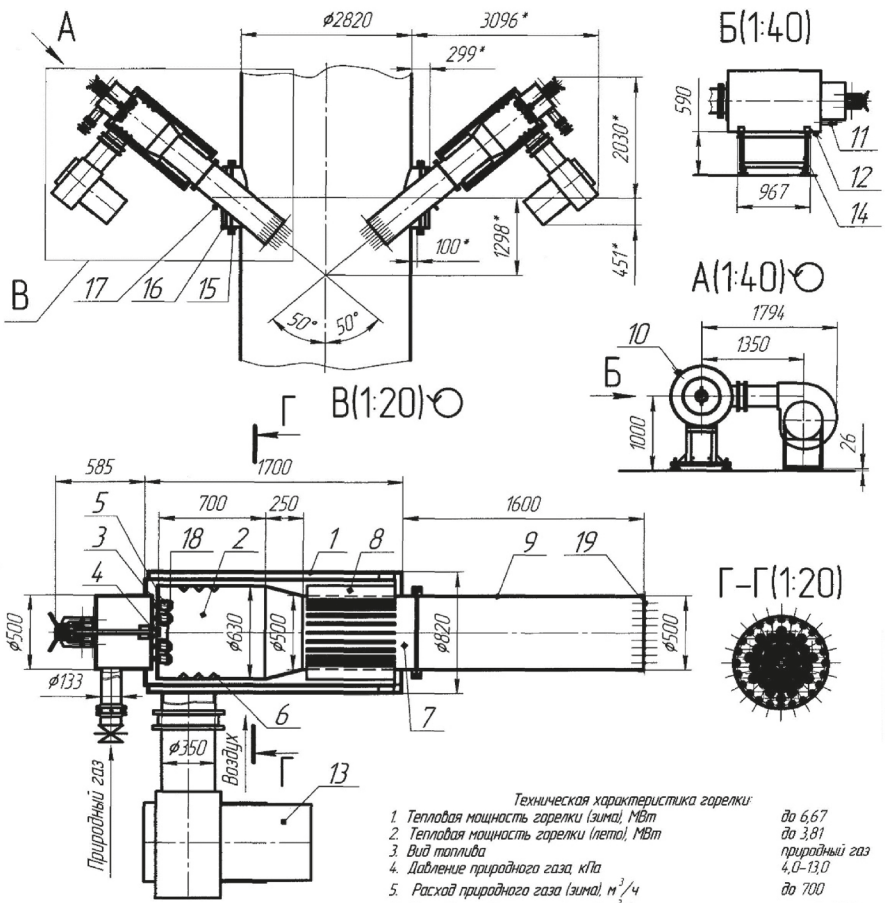
К основным газовым соплам газ поступает по трубе в патрубок газовый, в коллектор газовый и выходит через отверстия сопел основных в камеру первичного горения.

К центральному соплу газ поступает в горелку открытием крана шарового газового и выходит через сопло газовое центральное в камеру первичного горения.

Газ основных сопел и центрального сопла поджигается запальной горелкой и контролируется датчиком контроля пламени.

Первичный вентиляторный воздух поступает в горелку через патрубок воздушный, далее по межтрубному пространству между корпусом горелки и камерой первичного горения и выходит через сопла воздушные в камеру первичного горения, охлаждая все сопла газовые, корпус горелки и камеру первичного горения.

Вторичный вентиляторный воздух используют для охлаждения рекуперативной насадки горелки и дымовой трубы. Вторичный воздух поступает от вентилятора, проходит по трубе открытием крана шарового воздушного и выходит в щелевой зазор межтрубного пространства между корпусом горелки и дымовой трубой, и далее поступает в камеру дымовой трубы для дожигания газа на выходе из горелки.



1. Воздухоохлаждаемый корпус горелочного устройства
2. Камера первичного горения
3. Сопла газовое
4. Сопла газовое регулируемое
5. Сопла воздушное
6. Сопла воздушное периферийное
7. Камера вторичного горения
8. Теплообменник (рекуператор)
9. Дымовая труба
10. Труба-гляделка
11. Запальная горелка
12. УФ-датчик контроля пламени
13. Вентилятор
14. Стол опорный горелочного устройства
15. Лаз
16. Компенсатор двухлинзовый
17. Вентиль для отбора проб
18. Стабилизатор горения газовых сопел
19. Стабилизатор горения

Техническая характеристика горелки:

1. Тепловая мощность горелки (зима), МВт	до 6,67
2. Тепловая мощность горелки (лето), МВт	до 3,81
3. Вид топлива	природный газ
4. Давление природного газа, кПа	4,0–13,0
5. Расход природного газа (зима), м³/ч	до 700
6. Расход природного газа (лето), м³/ч	до 400
7. Расход природного газа на запальную горелку, м³/ч	до 10
8. Давление воздуха, кПа	4,0–13,0
9. Расход воздуха, м³/ч	до 7000
10. Расход воздуха на запальную горелку, м³/ч	до 100
11. Коэффициент избытка воздуха	1,0 – 1,2
12. Разрежение в газопроводе ф2820, кПа	11,5
13. Расход газа в газопроводе ф2820(ну), тыс. м³/ч	350
14. Температура газа в газопроводе ф2820 равна температуре наружного воздуха, °С	-10–+27
15. Температура подогретого газа в газопроводе ф2820, °С	+80±3
16. Вес установки для подогрева агломерационного газа:	
16.1. Горелочное устройство, кг	900
16.2. Дымовая труба, кг	350
16.3. Вентилятор ВЦ 14-46-5,0, кг	1040

Предусмотрен ручной и автоматический режимы управления работы горелки.

Рис. 3.1. Установка горелок

Установка горелки для подогрева «грязного» агломерационного газа перед фильтрами сухой газоочистки

Факел горелки

3. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ГНП.Р-250-31 УСТАНОВЛЕННЫХ НА АГЛОМАШИНАХ ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ»

Горелка газовая рекуперативная ГНП.Р-250-31 (Рис. 4) относится к горелкам комбинированным, с принудительной подачей газа, с неполным предварительным смешиванием, работающим на природном газе, газовых смесях или коксовом газе; обеспечивающих переход с одного вида газообразного топлива на другой, а также совместное их сжигание при технологической необходимости.

В условиях эксплуатации горелок ГНП.Р-250-31 (4 шт.) в горне агломашины агломерационного цеха ПАО «Запорожсталь» (Рис. 5) для отопления горна (горнов) используют газовые смеси: природно-доменную смесь (ПДС), коксо-доменную смесь (КДС), природно-коксо-доменную смесь (ПКДС) — как основные виды топлива и природный газ (ПГ), как резервный вид топлива.

Каждая горелка ГНП.Р-250-31, как основная горелка зажигательного горна агломашины, оснащена электродом контроля пламени и горелкой запальной ZMI 25R600 производства «Kromschroeder» (Германия), вмонтированной в корпус горелки основной, предназначенной для розжига горелки основной, как в ручном, так и в автоматическом режиме.

Горелочное устройство ГНП.Р-250-31 предназначено для отопления горнов агломашин №№ 2–6 ПАО «Запорожсталь» с использованием газовых смесей, как основного вида топлива и природного газа (коксового газа — КГ) в качестве резервного вида топлива.

Воздух применяется для организации горения газовой смеси или природного газа, КГ, а также для охлаждения рекуперативной насадки носика горелки.

Рекуперативная насадка носика горелки, сопло рекуперативное выполнены из жаропрочной стали.

В конструкции горелки применяется периферийная подача газовой смеси со своим соплом газовых смесей и центральная подача природного газа со своим соплом природного газа, при которых газовые струи, имеющие более высокую скорость (до 50 м/сек), чем воздушные, пересекают закрученный поток воздуха, движущийся со скоростью 20 ÷ 25 м/сек, под углом 45°. Такое взаимодействие потоков газа и воздуха и их частичная рециркуляция в рекуперативной насадке носика горелки с использованием конструктивно инжекционных каналов (инжекторов) в газовых соплах, и установка в носике горелки стабилизатора горения, обеспечивают эффективное сжигание газо-воздушной смеси, а также исключают отрыв факела при всех меняющихся расходах газа и воздуха.

Основные номинальные эксплуатационные параметры энергоносителей перед горелкой:

1. Топливо:	газовые смеси (ПДС,КДС,ПКДС) и ПГ
2. Калорийность газовых смесей, ккал/м^3	2000–2500
3. Калорийность ПГ, ккал/м^3	8120 –8150
4. Расход газовых смесей, м^3/час	300–450
5. Расход ПГ, м^3/час	80–120

6. Давление газовых смесей перед агломашиной, КПа	3,0–6,0
7. Давление ПГ перед агломашиной, КПа	4,0–6,0
8. Расход воздуха, м³/час	1000–1500
9. Давление воздуха перед агломашиной, КПа	4,0–6,0
10. Коэффициент избытка воздуха α	1,05–1,15
Габаритные размеры горелки ГНП.Р-250-31:	
• длина корпуса горелки, мм	721
• длина горелки с газовым коленом, мм	1336
• диаметр корпуса горелки, мм	273
• диаметр носика горелки, мм	273
Масса горелки ГНП.Р-250-31 , кг	140

Контроль и регулирование расхода топлива, вентиляторного воздуха проводится по существующим приборам КИПиА агломашины.

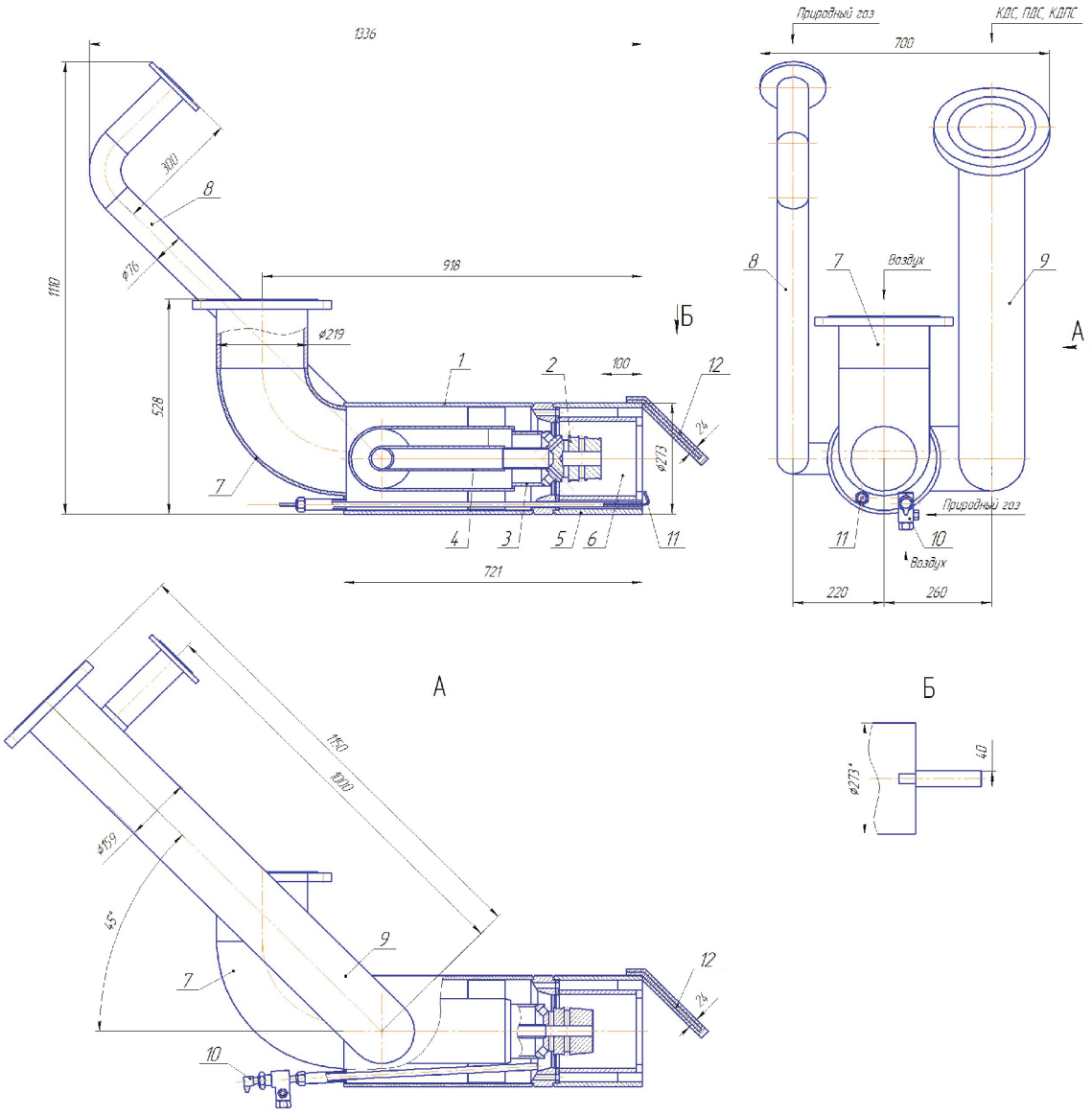


Рис. 4 Общий вид горелки ГНП.Р-250-31

Горелка ГНП.Р-250-31 (Рис. 4) состоит из следующих основных элементов:
1. Корпус горелки (поз. 1).
2. Сопло рекуперативное (поз. 2).
3. Труба газовая периферийная газовых смесей (поз. 3).
4. Труба газовая центральная ПГ (поз. 4)
5. Рекуперативная насадка носика горелки (поз. 5).
6. Камера смешивания (поз. 6)
7. Колено воздушное (поз. 7)
8. Колено ПГ (поз. 8)
9. Колено газовых смесей (поз. 9)
10. Запальная горелка (поз. 10)
11. Контрольный электрод (поз. 11)
12. Стабилизатор горения (поз. 12)

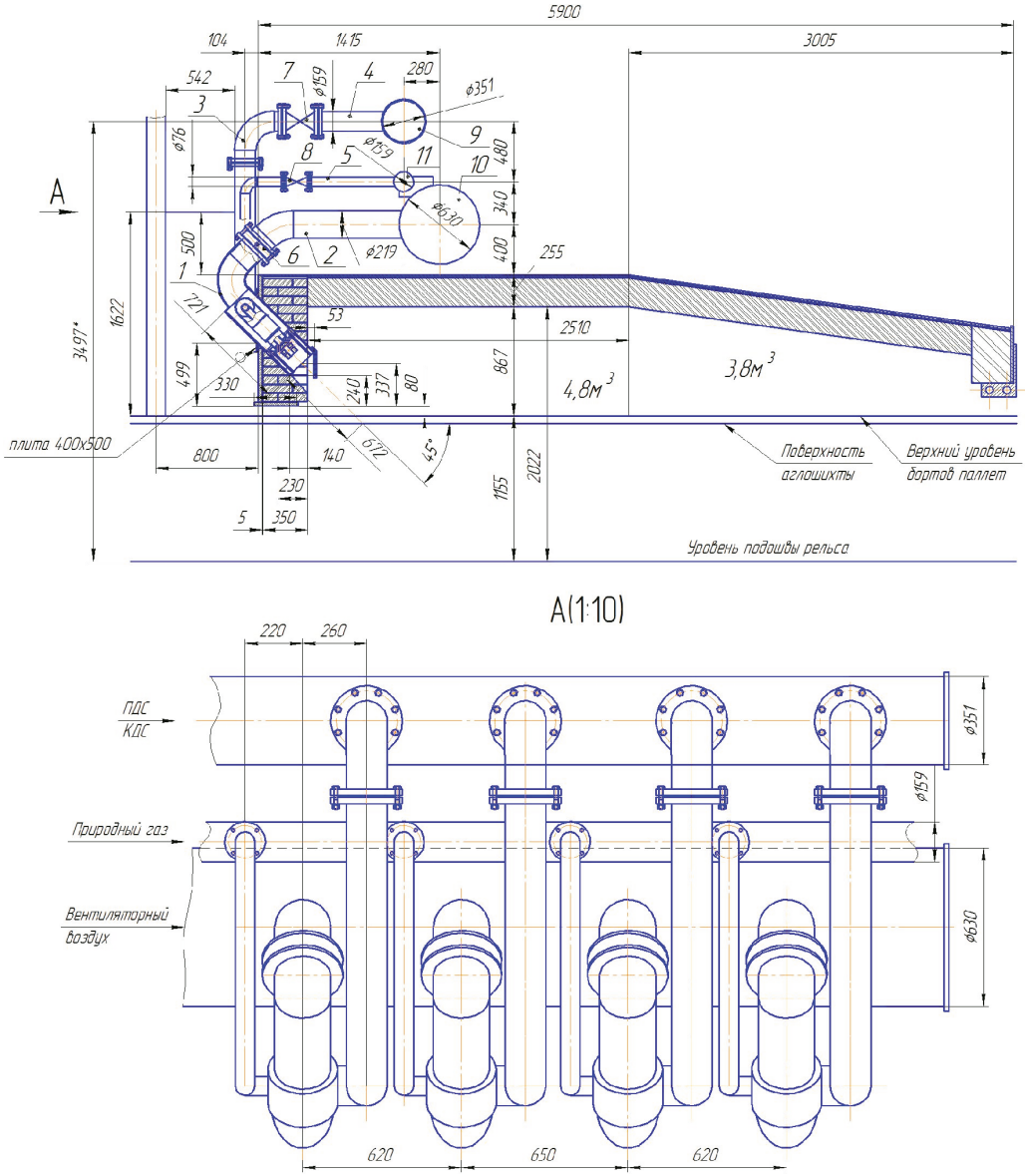


Рис. 5. Схема установки горелки ГНП.Р-250-31 в торцевой стене агломашины ПАО «Запорожсталь»

Работа 4-х горелок ГНП.Р-250-31 в торцевой стене горна агломашины, установленных под углом 45° показана на Рис. 6; 6.1.

В существующих условиях эксплуатации расход ПГ на горн составляет 330–340 м³/час, расход ПДС, КДС — 1050–1100 м³/час калорийностью 2400–2500 ккал/м³.

Рис. 6. Работа горелок ГНП.Р-250-31 горна агломашины

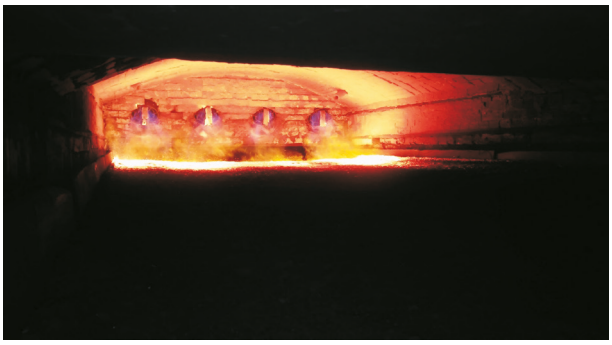


Рис. 6.1. Работа горелок ГНП.Р-250-31 горна агломашины

4. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ГОРЕЛКИ ГАЗОКИСЛОРОДНОЙ ГГК.Р-400/1000 ДЛЯ УДАЛЕНИЯ НАСТЫЛЕЙ В ЧУГУНОВОЗНЫХ КОВШАХ ПАО «АРСЕЛОРМИТТАЛ КРИВОЙ РОГ»

Горелка газокислородная ГГК.Р-400/1000 (Рис. 7) представляет собой многосопловую газокислородную горелку с принудительной подачей природного газа, сжатого воздуха и кислорода без предварительного смешивания. Сжатый воздух применяется для охлаждения корпуса горелки, газовых и кислородных сопел и для организации горения газовой смеси. Кислород используется для организации горения газовой смеси и создания высоких температур, обеспечивающих расплавление настылей.

Горелка предназначена для разогрева и расплавления настылей в чугуновозных ковшах при ее эксплуатации в Установке по удалению настылей из чугуновозных ковшей, далее Установка (Рис. 9).

Установка по удалению настылей из чугуновозных ковшей в ДЦ-1 АДД ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» эксплуатируется с 2013 года.

Основные эксплуатационные параметры энергоносителей

Установки и горелки

- Топливо — природный газ (Q = 8100–8150 ккал/м³)
- Давление природного газа в трубопроводе перед установкой, рабочее, атм. — 1,1
- Давление кислорода в трубопроводе перед установкой рабочее, атм. — 12
- Давление сжатого воздуха в трубопроводе перед установкой, рабочее, атм. — 3–4
- Расход природного газа на горелку, м³/ч — 0–150
- Оптимальный расход природного газа на горелку, м³/ч — 0–120
- Расход кислорода на горелку, м³/ч — 0–150
- Оптимальный расход кислорода на горелку, м³/ч — 0–90
- Расход сжатого воздуха на горелку, м³/ч — 0–900
- Коэффициент избытка воздуха α — 1,1–1,25
- Коэффициент рабочего регулирования — 4,0
- Расход природного газа на розжиг горелки, м³/ч — 0–60

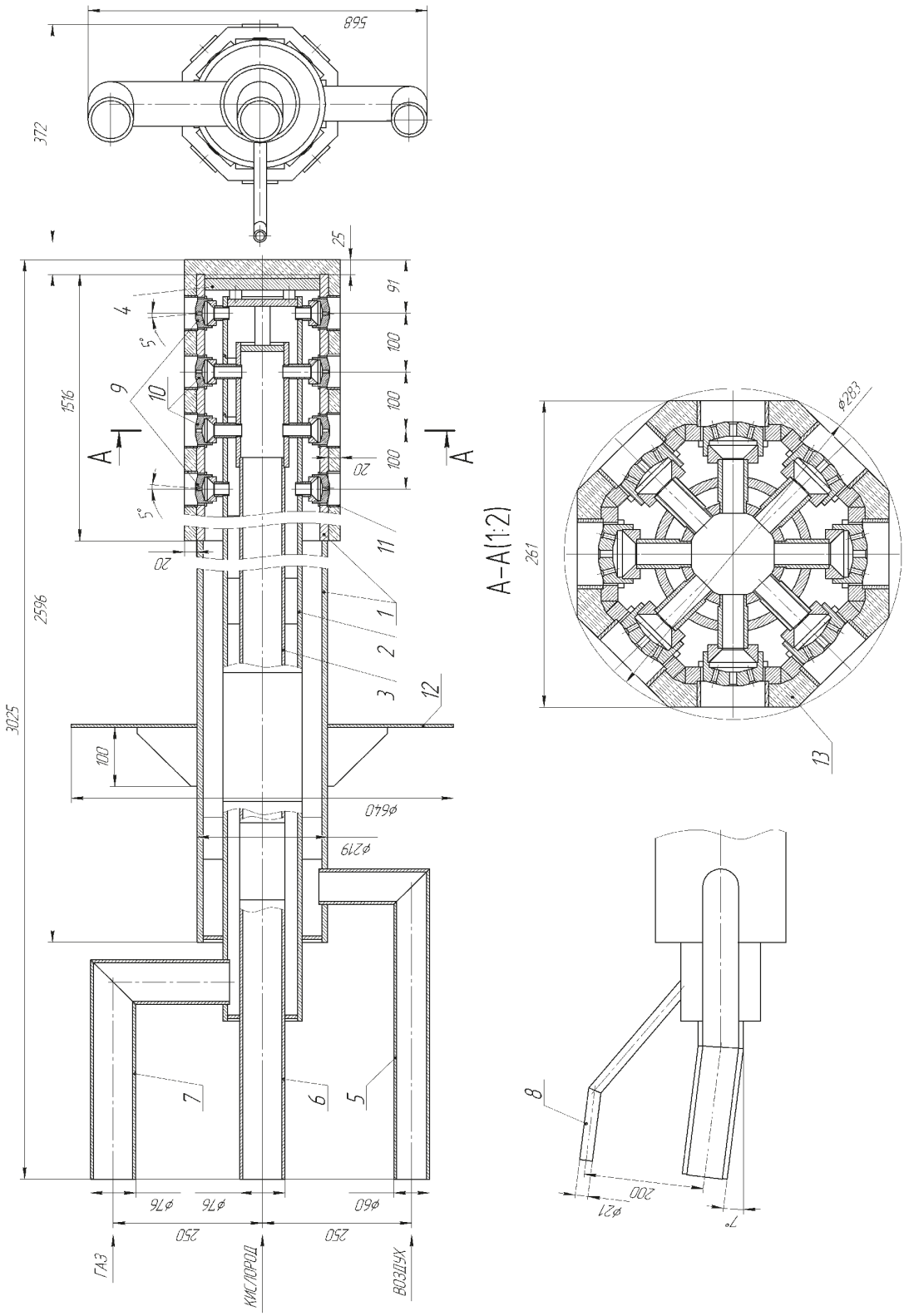


Рис. 7. Общий вид горелки ГГК.Р-400/1000

Энергоносители к горелке ГГК.Р-400/1000 подаются по металлорукавам при помощи блоков манипулятора:

- природный газ по металлорукаву ∅ 65 мм длиной 22 м;
- сжатый воздух по металлорукаву ∅ 50 мм длиной 22 м;
- кислород по металлорукаву ∅ 65 мм длиной 22 м.

Природный газ на розжиг горелки подается по металлорукаву ∅ 20 мм длиной 22м.

Устройство горелки ГГК.Р-400/1000

Горелка ГГК.Р-400/1000 состоит из следующих основных элементов:

1. Корпус горелки (поз. 1)
2. Труба газовая (поз. 2)
3. Труба кислородная (поз. 3)
4. Заглушка (поз. 4)
5. Патрубок воздушный (поз. 5)
6. Патрубок кислородный (поз. 6)
7. Патрубок газовый (поз. 7)
8. Сопло газовое (поз. 8)
9. Сопло кислородное (поз. 9)
10. Сопло воздушное (поз. 10)
11. Труба газовая запальная (поз. 11)
12. Защита сопел (поз. 12)
13. Футеровка горелки (поз. 13).

Основные габаритные размеры горелки:

- длина горелки, мм 3025
- диаметр горелки, мм 283
- масса горелки, кг 400

Корпус горелки — воздухоохлаждаемый, выполнен из жаропрочной стали

В корпусе горелки ГГК.Р-400/1000 расположены сопла газовые — два ряда по 8-м сопел, в каждом сопле по три отверстия; кислородные сопла — два ряда по 8-м сопел, в каждом сопле по три отверстия.

Газовые сопла расположены по рядно между кислородными соплами, с расположением всех рядов сопел по осям — газовых и кислородных 100 мм.

Сопла воздушные расположены по периметру всех газовых и воздушных сопел и предназначены для их охлаждения и для охлаждения корпуса горелки в целом в процессе эксплуатации горелки.

Принцип работы горелки ГГК.Р-400/1000

Для работы горелки ГГК.Р-400/1000 предусмотрена первичная и основная подача природного газа.

Первичный газ поступает по металлорукаву в трубу газовую запальную, далее в патрубок газовый и в трубу газовую, и выходит через отверстия сопел газовых горелки. Первичный газ поджигается переносным факелом вне ковша вручную при открытии крана шарового, горит и поджигает основной газ в ковше, поступающий в общие газовые сопла горелки по металлорукаву открытием крана запорного горелки. Основной газ подают в горелку после подачи сжатого воздуха в горелку по металлорукаву открытием затвора дискового запорно-регулирующего на 30% шкалы прибора для организации первоначального горения газа. При стабильном горении газа сжатый воздух открывают на 100% шкалы прибора, в первую очередь, для охлаждения корпуса горелки и организации горения газо-воздушной смеси в ковше.

Сжатый воздух в горелку поступает через патрубок воздушный, далее по межтрубному пространству между корпусом горелки и трубы газовой и выходит через сопла воздушные, охлаждая все сопла газовые и кислородные, и корпус горелки в целом.

Кислород в горелку поступает через патрубок кислородный в трубу кислородную и выходит через отверстия кислородных сопел.

Кислород используется для организации горения газовой смеси и создания высоких температур, обеспечивающих расплавление настылей.

УСТАНОВКА ПО УДАЛЕНИЮ НАСТЫЛЕЙ. ОПИСАНИЕ

Установка по удалению настылей из чугуновозных ковшей представляет собой горелочное устройство, подвешенное за приспособление чалочное крюком манипулятора, соединенное с технологическими трубопроводами энергоносителей установки: природного газа, кислорода, сжатого воздуха системой гибких металлорукавов, подвешенных на неподвижных блоках с установкой контргрузов, а также запорной арматурой энергоносителей.

Дымовые газы улавливаются зонтом поворотным и по газоходу отводящему при открытом клапане дроссельном дымохода отводятся в цеховую аспирационную систему литейного двора доменной печи.

Для предотвращения выбросов дымовых газов над чугуновозным ковшом предусмотрена крышка и лепестки, закрывающие смотровые отверстия — окна. Поворот зонта поворотного и манипулятора осуществляется вручную рычагами с фиксацией их в рабочем положении.

Для подъёма горелки установлен мотор-редуктор электрической лебедки, закрепленной на манипуляторе. Для укладки металлорукавов используются контргрузы.

Последовательность работы установки

1) Чугуновозный ковш устанавливается в проектное положение;
2) Чугуновозный ковш накрывается крышкой;
3) Горелка перемещается в промежуточное положение возле съемного цепного ограждения;
4) Открывается кран технологической схемы газоснабжения с подачей природного газа на горелку;
5) Вручную факелом зажигается пламя на горелке ;
6) Снимается съемное цепное ограждение;
7) Поворачивается консоль манипулятора в рабочее положение над чугуновозным ковшом и фиксируется крюком;
8) Навешивается съемное цепное ограждение;
9) Горелка опускается в ковш электрической лебедкой;
10) Поворачивается зонт в рабочее положение над отверстием для отвода продуктов горения в крышке и фиксируется рычагом;
11) Открывается клапан дроссельный на газоходе отводящем.
12) Опускаются лепестки ручными лебедками на смотровые отверстия-окна в крышке;
13) Подается основной газ на горелку ГГК.Р-400/1000 путем: открытия (взвода) клапана предохранительного ПКН-100, открытия кранов трубопроводной арматуры технологической схемы газоснабжения установки, затем (в последовательности — сжатый воздух, кислород);
14) Контроль технологического процесса оплавления настылей осуществляется через смотровые отверстия — окна в крышке.

Рис. 8. Установка горелки в крышку ковша

Рис. 8.1. Демонстрация работы горелки без крышки

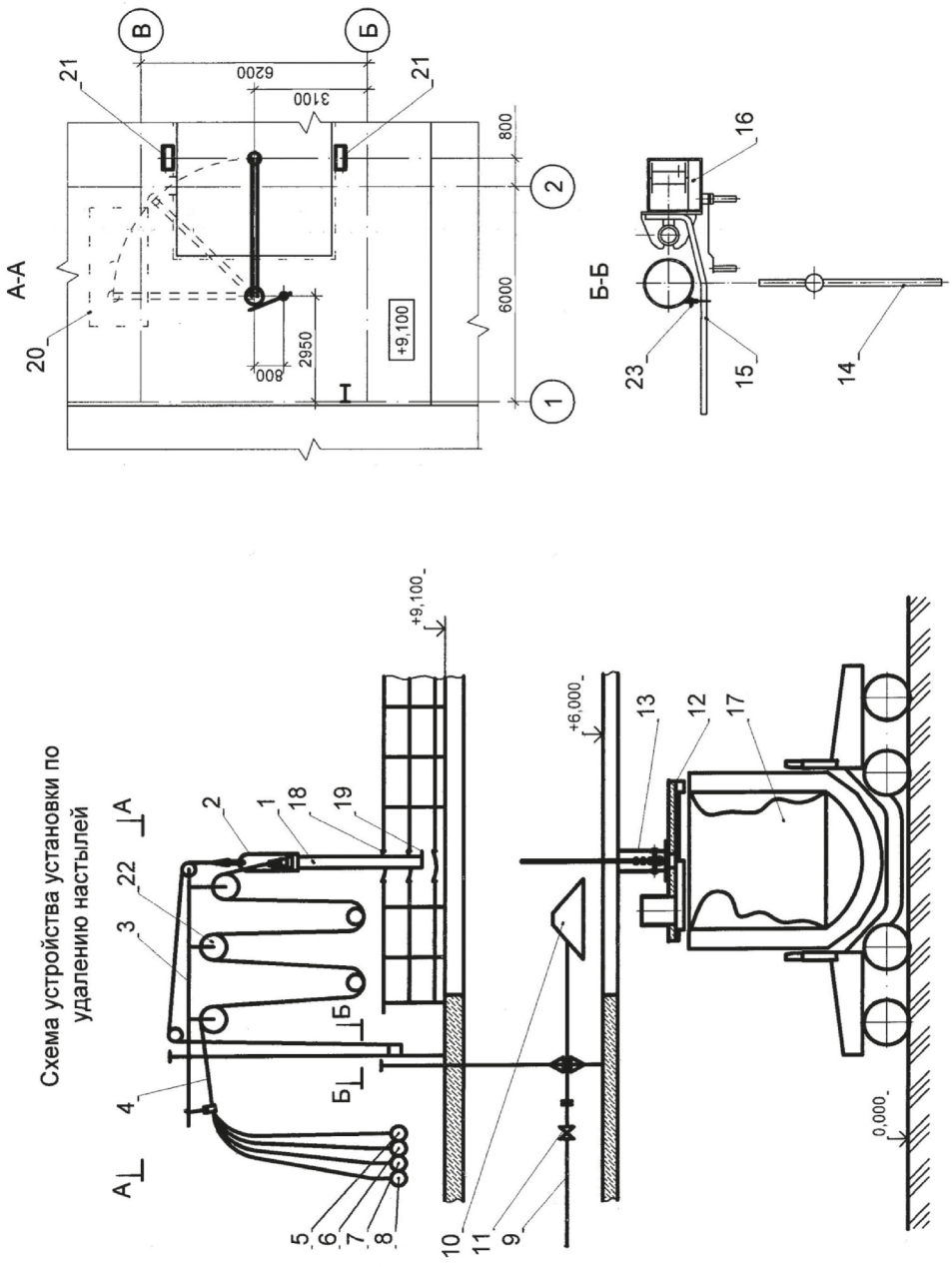


Рис. 9. Общий вид установки по удалению настылей

А.Н. Симоненко, ООО «Интер-С Груп»

ТЯГОДУТЬЕВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

В настоящее время, специалисты промышленных предприятий ожидают от поставщиков тягодутьевого оборудования всё более эффективные машины с высоким КПД, а также сравнительно длительным сроком службы.

Анализируя опыт применения тягодутьевых машин в экстремальных промышленных условиях, условиях следует отметить, что машины подвергаются многочисленным видам нагрузки:

A) Ускорение и центробежные силы переменной мощности.

B) Переменные температуры (простой, запуск, различные рабочие состояния).

C) Колебания разных величин и направлений.

D) Коррозионное воздействие транспортируемой среды.

E) Абразивный износ.

Для правильного планирования и определения размеров конструктивных элементов уже на этапе проектирования важно понимать совокупность различных нагрузок, которые могут встречаться в отдельности или совместно при эксплуатации оборудования. Фундаментальное понимание технологических процессов, в которых применяется тягодутьевое оборудование, в совокупности с богатым опытом позволяют сделать правильный выбор компонентов и технологий изготовления этих машин.

Ошибки в процессе разработки машин, недостаточный опыт производителя при изготовлении и выборе материала влекут за собой не только простой производства, но и большие издержки на ремонт (Рис. 1).

Чтобы «оптимизировать» ликвидность тягодутьевой машины, производители зачастую готовы идти на компромиссы при разработке

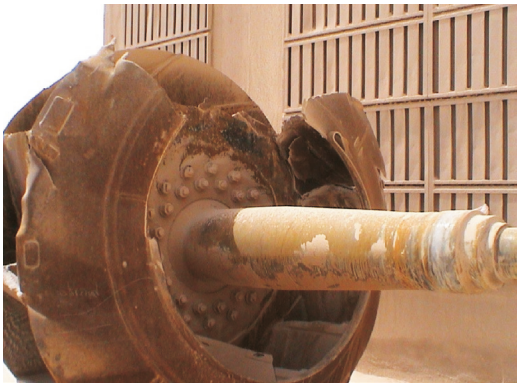


Рис. 1. Повреждение ротора вызвано усталостью металла из-за высоких колебаний

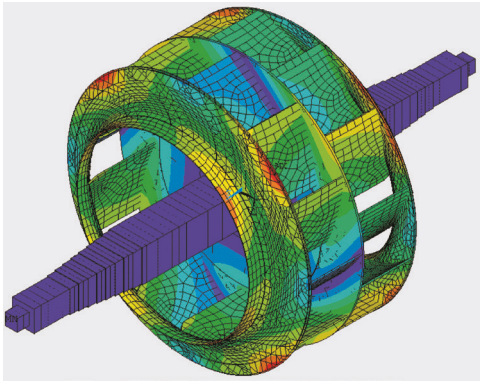


Рис. 2. Расчет параметров ротора по методу конечных элементов

конструкции. Такой подход на стадии выбора материала или его обработке зачастую приводи к выходу машины из строя, и как следствие, длительным простоям производства.

Директивы изготовления Venti Oelde GmbH

Уже на этапе разработки аэродинамической модели машины закладываются основы для длительной безотказной эксплуатации (Рис. 2). Очень важно, что выбранная машина точно отвечала требованиям технологического процесса, в котором она будет установлен.

Основные параметры при разработке тягодутьевых машин

- Частота вращения
- Мощность на валу (КПД)
- Скорость входящего и исходящего потока

Параметры, обусловленные процессом разработки

- Выбор материала
- Ресурс подшипников (не менее 100.000 рабочих часов)
- Выбор муфты (Фактор критического момента вращения — мин. 1,75)
- Двустороннее крепление (подшипниковые узлы) рабочего колеса
- Установка на бетонной фундаментной основе.

Детальный подход

- Критический момент вращения с коэффициентом 1,3–1,8
- Противодействие налипанию. (Форма лопаток. При необходимости мы используем системы впрыска воды и подачи сжатого воздуха, а также звуковые системы, которые позволяют отделять налипающие материалы во время работы).
- Противодействие износу (Форма лопаток. Выбор защиты от износа).

Изменение нагрузки (частотный привод), предотвращение усталости материала.

Оборотная скорость на внешнем ободе рабочего колеса доходит до физически возможных границ. Компания Venti Oelde посвятила многие годы исследованию температурной зависимости прочности и пределов текучести материала, что позволило ей собрать собственные исходные данные и ввести свои стандарты безопасности.

Рис. 3. Балансировка роторного узла. Вес до 50 т, диаметр рабочего колеса 5 м

После выполнения инжиниринга, наши машины производится в собственных современных производственных цехах в г. Ольде, Германия (Рис. 3).

Рис. 4. Проверка качества сварных узлов во время каждого производственного этапа

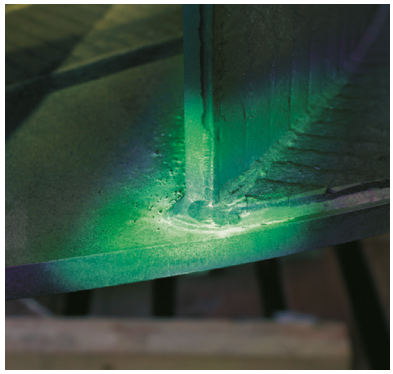


Рис. 5. Техническая дефектоскопия ультразвуковым или краскокапиллярным методом

Рис. 6. Механически обработанный проточный проход защитного диска способствуют безубыточному аэродинамическому потоку (ламинарное течение воздуха) в рабочее колесо, тем самым нагнетатели Venti Oelde обеспечивают высокий КПД

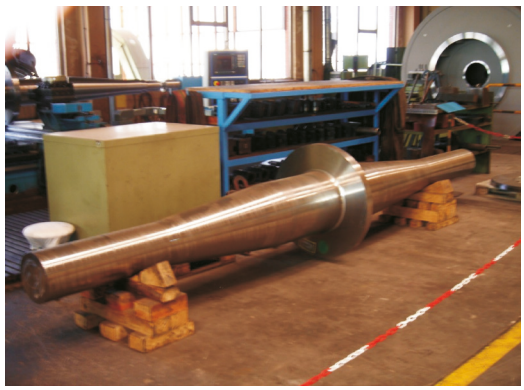


Рис. 7. Кованый фланцевый вал. Винтовое соединение между валом и ротором — стандартное исполнение

Опытные и квалифицированные сотрудники, накопленный опыт, а так же существующая система качества являются гарантом высокого качества продуктов нашего предприятия.

Рис. 8. Рис. 9. Изготовление корпуса

А.А. Шульга, ПАО «ЕВРАЗ ДНКХЗ»

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В УСЛОВИЯХ МЕЖБАССЕЙНОВОЙ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ПАО «ЕВРАЗ ДНКХЗ»

Формирование угольной сырьевой базы коксования в современных условиях характеризуется следующими основными факторами [1]:

- возросшими требованиями к качеству доменного кокса в связи с широким внедрением технологии вдувания пылеугольного топлива (ПУТ) в доменные печи на металлургических предприятиях;
- сокращением использования украинских углей в сырьевой базе завода в связи с ситуацией на Донбассе;
- расширением географии поставок углей из стран дальнего зарубежья.

Как уже отмечалось в работах [2, 3], сырьем для получения кокса улучшенного качества могут быть низкосернистые угли с индексом основности $И_о \leq 2,5$. Из углей действующего шахтного фонда Украины, требуемыми свойствами обладают угли всего двух шахт: им. Скочинского (марка «Ж») и ш/у «Покровское» (марка «К»).

Исходя из этого, становится очевидным необходимость привлечения в сырьевую базу коксования предприятий Украины импортных углей с низкими значениями содержания серы и индекса основности.

Согласно работе [1] долевое участие украинских углей в сырьевой базе коксования за последние 5 лет (с 2010 по 2014 г.) снизилось с 65,7 до 45,8% или на 19,9%; доля российских углей возросла с 24,3 до 33,0% или на 8,7%; доля американских углей увеличилась с 5,7 до 13,2% или на 7,5%. Начиная с 2013 года, в сырьевой базе коксования используются угли Канады, а с 2014 года — Австралии. В целом долевое участие углей дальнего зарубежья за рассматриваемый период возросло с 5,8 до 16,4% или на 10,6%.

В работе [4] при анализе качества угольных концентратов, наиболее часто используемых в шихтах коксохимических заводов Украины, показано, что они значительно различаются по величине размолоспособности, выраженной индексом Хардгрова, — не только за счет различной стадии метаморфизма, но и за счет различного петрографического состава.

Основную роль в определении технологической ценности угольного сырья и совершенствовании качества коксовой продукции играет ЦЗЛ.

В настоящее время, когда увеличились поставки зарубежных углей, в центре внимания находятся процессы взаимодействия импортного сырья с углями Украины и России, изучается влияние угольных концентратов, представленных в виде сложных многокомпонентных смесей. В данных условиях важной задачей становится оперативная оценка качества угольных концентратов для их рационального использования в угольной шихте.

На предприятии были выработаны подходы к решению задач оптимизации шихт для коксования, к критериям оценки качества угольной сырьевой базы. На основании лабораторных исследований и экспериментальных коксований разработаны фундаментальные принципы составления и управления составом угольных шихт для коксования.

Они включают в себя следующие положения:

- систематическое изучение углей как сырья для коксования, включая исследования взаимодействия углей разных марок и типов;
- определение истинной марочной принадлежности с учетом химико-петрографических характеристик и рефлектограммного анализа углей сырьевой базы завода;
- оценка технологических свойств угля для определения его соответствия определенному компоненту шихты (спекающему, коксующему, отощающему);
- коксования на экспериментальной печи «Карботест» индивидуальных углей и модельных смесей, корректировка производственных шихт по результатам выполненных работ;
- составление алгоритма подбора угольных композиций для достижения заданного качества кокса и оптимизация стоимости шихты;
- прогноз качества кокса на основании изучения физико-химических свойств углей и критериев оптимальности угольных смесей.

Были проведены исследования, подтвердившие целесообразность оптимизации производственных шихт на основании оценки химико-петрографических характеристик свойств углей и последующего математического моделирования.

На каждом предприятии строятся свои математические модели, описывающие взаимосвязи качества шихты с коксом, выбираются характеристики, которые наиболее адекватно описывают эти связи. При этом учитываются схема подготовки шихты, метод тушения кокса, конструкция и текущее состояние печного фонда.

Для оценки свойств угольного сырья в лаборатории используются различные методы анализа. Для углей и их смесей, обладающих свойством образовывать пластическую массу, особое значение имеют показатели вязкости пластической массы и динамика изменений при термической деструкции, так как позволяют (согласно выявленным закономерностям) объяснять особенности формирования структуры кокса и изменения его качества. Математическая и статистическая обработка результатов, полученных этими методами, позволяет произвести оценку изменений качества сырьевой угольной базы в случаях, тогда как толщина пластического слоя Y по Сапожникову не чувствительна к структурным и генетическим изменениям угля. Для определения пластично-вязких свойств углей и их смесей, играющих важную роль в формировании прочной структуры кокса, используются методы Одибера-Арну и Гизелера.

В ЦЗЛ выполнен ряд работ по выявлению оптимальных значений текучести угольной шихты по методу Гизелера и дилатации по методу Одибера-Арну для обеспечения высокой механической прочности кокса, которые позволяют утверждать, что указанные методы являются более точными и объективными. Данные методы позволяют расширить характеристику и дополняя перечень основных показателей значениями дилатации, пластичности и температурным интервалом пластического состояния.

Вследствие широкого диапазона различий в качестве привлекаемых на коксование угольных компонентов, наиболее целесообразно применять прогрессивные схемы подготовки (ГДК, ДДК) угольных

Рис. 1. Дилатометр Одибера —Арну

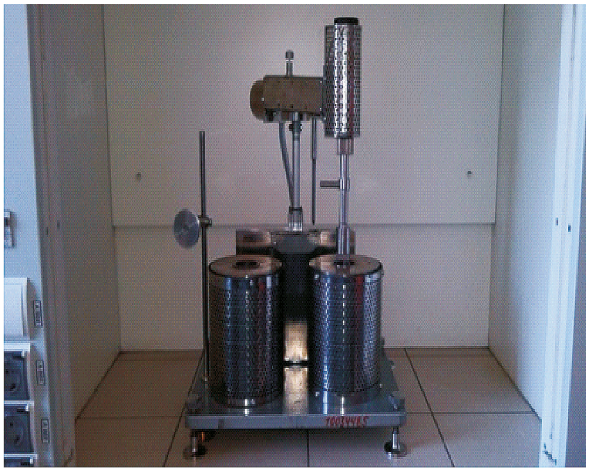


Рис. 2. Вискозиметр Гизелера

шихт, позволяющие избежать, с одной стороны, самоотощения шихты, а с другой — большого числа центров трещинообразования в производимом доменном коксе.

В табл. 1 приведены марочный и компонентный составы угольной шихты с учетом закрепления угольных компонентов по силосам закрытого склада углей.

Таблица 1. Марочный и компонентный составы угольной шихты ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский коксохимический завод» с учетом закрепления угольных компонентов по силосам дозировочного отделения

Номер силоса	Наименование	Марка	% участия
1, 2	ЦОФ «Самсоновская», Украина	Ж	17,0
3	«Carter Roag», США	Ж	3,0
5, 20	«Peak Downs North», Австралия	К	15,0
6, 8, 12	ЦОФ «Самсоновская», Украина	К	18,0
7	ЦОФ «Узловская», Украина	К	5,0
9	ЦОФ «Самсоновская», Украина	К	5,0
10, 11	«Pocahontas», США	ОС	7,0
13, 15, 17	ООО «Промугольсервис», Россия	ГЖО	21,0
16	ЦОФ «Комсомольская», Украина	Г	6,0
19	ЦОФ «Добропольская», Украина	Г	3,0

Данные табл. 1 свидетельствуют, что в сырьевую базу ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский коксохимический завод» входили угли как украинских (ЦОФ «Самсоновская», ЦОФ «Узловская», ЦОФ «Комсомольская», ЦОФ «Добропольская»), так и зарубежных («Carter Roag», «Peak Downs North», «Pocahontas», ООО «Промугольсервис») поставщиков.

Исходя из приведенных данных, можно констатировать, что 30% угольной шихты составляют угли газовой («Г», «ГЖО») группы, 20% жирной группы, 43% углей марки «К» и 7% угля марки «ОС».

В таблице 2–4 приведены технологические свойства, петрографическая характеристика (включая рефлектограмму витринита) и гранулометрический состав исследованных угольных компонентов.

Таблица 2. Технологические свойства угольных концентратов ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский коксохимический завод»

№ силоса	Наименование	Марка	Технический анализ, %			Пластометрические показатели, мм	
			A^d	S^d_t	V^{daf}	x	y
16	ЦОФ «Комсомольская», Украина	Г	7,6	1,42	38,5	46	14
19	ЦОФ «Добропольская», Украина	Г	6,0	1,48	38,4	42	13
13	ООО «Промугольсервис», Россия	ГЖО	6,7	0,58	37,1	29	10
15	ООО «Промугольсервис», Россия	ГЖО	7,1	0,60	37,0	36	10
17	ООО «Промугольсервис», Россия	ГЖО	7,0	0,61	37,1	35	11
1	ЦОФ «Самсоновская», Украина	Ж	8,0	2,08	33,9	28	23
2	ЦОФ «Самсоновская», Украина	Ж	7,6	2,13	32,4	23	22
3	«Carter Roag», США	Ж	9,8	0,64	31,2	35	16
5	«Peak Downs North», Австралия	К	9,1	0,53	24,1	31	15
6	ЦОФ «Самсоновская», Украина	К	8,4	2,45	27,3	25	20
7	ЦОФ «Узловская», Украина	К	6,4	1,52	21,2	13	15
8	ЦОФ «Самсоновская», Украина	К	7,9	2,51	26,2	24	17
9	ЦОФ «Самсоновская», Украина	К	7,7	2,35	29,7	28	20
12	ЦОФ «Самсоновская», Украина	К	8,4	2,45	27,3	30	16
20	«Peak Downs North», Австралия	К	8,9	0,52	24,3	34	15
10	«Pocahontas», США	ОС	7,8	0,82	18,0	15	11
11	«Pocahontas», США	ОС	7,4	0,78	17,2	20	10

Таблица 3. Петрографическая характеристика угольных концентратов ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский коксохимический завод»

№ силоса	Наименование	Марка	Петрографический состав (без минеральных примесей),%					Средний показатель отражения витринита,	Стадии метаморфизма витринита,%						
									менее 0,50	0,50–0,65	0,66–0,89	0,90–1,19	1,20–1,39	1,40–1,69	1,70–2,59
									Марки угля, условно соответствующие стадиям метаморфизма витринита						
			Vt	Sv	I	L	Σ ОК	R_o	Д	ДГ	Г	Ж	К	ОС	Т
16	ЦОФ «Комсомольская», Украина	Г	67,5	–	22,8	9,7	22,8	0,81	–	6,0	68,0	26,0	–	–	–
19	ЦОФ «Добропольская», Украина	Г	74,8	–	22,0	3,2	22,0	0,79	–	4,0	88,0	8,0	–	–	–
13	ООО «Промугольсервис», Россия	ГЖО	75,1	–	23,9	1,0	23,9	0,70	–	12,0	87,0	1,0	–	–	–
15	ООО «Промугольсервис», Россия	ГЖО	74,9	–	24,6	0,5	24,6	0,70	–	13,0	86,0	1,0	–	–	–
17	ООО «Промугольсервис», Россия	ГЖО	73,9	–	25,4	0,7	25,4	0,71	–	15,0	81,0	4,0	–	–	–
1	ЦОФ «Самсоновская», Украина	Ж	87,0	–	9,6	3,4	9,6	0,97	–	–	34,0	59,0	7,0	–	–

Продолжение табл. 3

№ силоса	Наименование	Марка	Петрографический состав (без минеральных примесей),%					Средний показатель отражения витринита,	Стадии метаморфизма витринита,%						
									менее 0,50	0,50–0,65	0,66–0,89	0,90–1,19	1,20–1,39	1,40–1,69	1,70–2,59
									Марки угля, условно соответствующие стадиям метаморфизма витринита						
			Vt	Sv	I	L	Σ ОК	R_o	Д	ДГ	Г	Ж	К	ОС	Т
2	ЦОФ «Самсоновская», Украина	Ж	88,3	–	10,0	1,7	10,0	1,00	–	–	20,0	71,0	7,0	2,0	–
3	«Carter Roag», США	Ж	86,4	–	11,0	2,6	11,0	1,09	–	–	–	91,0	9,0	–	–
5	«Peak Downs North», Австралия	К	74,1	–	25,9	–	25,9	1,20	–	–	–	52,0	47,0	1,0	–
6	ЦОФ «Самсоновская», Украина	К	87,7	–	11,8	0,5	11,8	1,21	–	–	3,0	38,0	54,0	5,0	–
7	ЦОФ «Узловская», Украина	К	89,1	–	10,9	–	10,9	1,44	–	–	–	9,0	23,0	67,0	1,0
8	ЦОФ «Самсоновская», Украина	К	89,7	–	10,3	–	10,3	1,22	–	–	2,0	26,0	70,0	2,0	–
9	ЦОФ «Самсоновская», Украина	К	88,0	–	10,8	1,2	10,8	1,28	–	–	19,0	44,0	34,0	3,0	–
12	ЦОФ «Самсоновская», Украина	К	88,3	–	11,1	0,6	11,1	1,20	–	–	4,0	33,0	60,0	3,0	–
20	«Peak Downs North», Австралия	К	71,8	–	28,2	–	28,2	1,20	–	–	–	46,0	53,0	1,0	–
10	«Pocahontas», США	ОС	75,4	–	24,6	–	24,6	1,55	–	–	–	4,0	4,0	89,0	3,0
11	«Pocahontas», США	ОС	73,3	–	26,7	–	26,7	1,57	–	–	–	1,0	3,0	85,0	11,0

Таблица 4. Гранулометрический состав угольных концентратов ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский коксохимический завод»

Номер силоса	Наименование	Марка	Гранулометрический состав (мм),%						
			> 13	6–13	3–6	1–3	0,5–1,0	> 0,5	0–3
16	ЦОФ «Комсомольская», Украина	Г	36,6	15,4	15,2	17,6	7,0	8,2	32,8
19	ЦОФ «Добропольская», Украина	Г	17,7	23,8	13,0	21,4	14,2	9,9	45,5
13	ООО «Промугольсервис», Россия	ГЖО	24,8	19,6	17,6	20,0	7,2	10,8	38,0
15	ООО «Промугольсервис», Россия	ГЖО	27,5	15,4	22,3	18,7	7,9	8,2	34,8
17	ООО «Промугольсервис», Россия	ГЖО	29,6	16,0	15,0	19,0	8,5	11,9	39,4
1	ЦОФ «Самсоновская», Украина	Ж	13,1	7,3	13,3	30,3	16,1	19,9	66,3
2	ЦОФ «Самсоновская», Украина	Ж	11,2	8,4	14,6	30,4	15,2	20,2	65,8
3	«Carter Roag», США	Ж	19,5	15,0	11,0	18,6	18,3	17,6	54,5
5	«Peak Downs North», Австралия	К	31,2	9,7	15,1	14,2	11,7	18,1	44,0
6	ЦОФ «Самсоновская», Украина	К	4,7	6,1	12,4	20,8	26,1	29,9	76,8
7	ЦОФ «Узловская», Украина	К	2,0	2,8	15,0	11,1	30,7	38,4	80,2
8	ЦОФ «Самсоновская», Украина	К	2,8	4,9	13,9	27,1	18,8	32,7	78,6

Продолжение табл. 4

Номер силоса	Наименование	Марка	Гранулометрический состав (мм),%						
			> 13	6–13	3–6	1–3	0,5–1,0	> 0,5	0–3
9	ЦОФ «Самсоновская», Украина	К	4,0	4,9	10,7	22,0	21,6	36,8	80,4
12	ЦОФ «Самсоновская», Украина	К	4,6	4,6	11,6	27,0	22,2	30,0	79,2
20	«Peak Downs North», Австралия	К	30,4	13,0	10,8	16,4	10,2	19,2	45,8
10	«Pocahontas», США	ОС	7,0	5,4	10,6	24,6	17,2	35,2	77,0
11	«Pocahontas», США	ОС	5,1	6,8	12,3	25,4	19,0	31,4	75,8

Данные таблиц свидетельствуют, что входящие в сырьевую базу угольные компоненты существенно различаются по своим свойствам. Угли газовой группы имеют повышенный выход летучих веществ (37,0–38,5%), невысокую спекаемость (10–14 мм), относительно высокое содержание фюзенизированных компонентов (22,0–25,4%) и низкое содержание зерен угля крупностью менее 3 мм (21,8–45,5%).

Указанные особенности углей газовой группы предопределяют их более тонкое измельчение в сравнении с углями спекающей основы («Ж»+«К») и отощенными спекающимися углями.

Угли марок «Ж» и «К» характеризуются значениями выхода летучих веществ на уровне 21,2–33,9%, толщины пластического слоя 15–23 мм, содержанием зерен крупностью менее 3 мм 45,8–80,4%.

В целом, данные угли довольно мягкие, не требующие тщательного дополнительного измельчения при подготовке угольной шихты. Обращает на себя внимание только австралийский угольный концентрат «Peak Down North», который имеет в сравнении с исследованной группой углей пониженные значения спекаемости (15 мм) и содержания класса 0–3 мм (45,8%), при повышенном содержании петрографически неоднородных компонентов (28,2%). По нашему мнению, с учетом возможности использования на предприятии предварительного измельчения углей, данный угольный концентрат перед окончательным измельчением угольной шихты целесообразно дробить в отделении предварительного измельчения совместно с углями газовой группы.

Отощенные спекающиеся угли представлены двумя пробами «Pocahontas», которые характеризуются спекаемостью на уровне 10–11 мм, содержанием фюзенизированных компонентов 24,6–26,7% и класса 0–3 мм в ситовом составе 75,8–77,0%. Данные угли являются мягкими и не требуют дополнительного измельчения. Все исследованные угли были неокисленными.

Существующая на предприятии схема подготовки угольной шихты предусматривает возможность предварительного дробления углей твердой группы с последующим их смешением с углями мягкой группы и окончательное измельчение всей сборной шихты.

В табл. 5–7 приведены технологические свойства, петрографическая характеристика и гранулометрический состав проб углей твердой группы, отобранных до и после предварительного измельчения, углей мягкой группы, а также угольной шихты до и после окончательного измельчения. Данные таблиц свидетельствуют, что мягкая часть шихты характеризуется спекаемостью, равной 18 мм, показателем отражения витринита 1,15% и содержанием класса 0–3 мм — 72,6%.

Таблица 5. Технологические свойства угольной шихты ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский коксохимический завод»

Шихта	Технический анализ,%			Пластометрические показатели, мм	
	A^d	S^d_t	V^{daf}	x	y
Мягкая часть до окончательного дробления	8,1	1,67	29,2	34	18
Твердая часть до предварительного дробления	8,2	0,98	33,8	50	12
Твердая часть после предварительного дробления	8,0	0,97	32,7	46	10
До окончательного дробления	8,3	1,39	29,9	38	16
После окончательного дробления	8,2	1,35	30,5	37	15

Таблица 6. Петрографическая характеристика угольных шихт ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский коксохимический завод»

Шихта	Петрографический состав (без минеральных примесей),%					Средний показатель отражения витринита, %	Стадии метаморфизма витринита, %						
							менее 0,50	0,50–0,65	0,66–0,89	0,90–1,19	1,20–1,39	1,40–1,69	1,70–2,59
							Марки угля, условно соответствующие стадиям метаморфизма витринита						
	Vt	Sv	I	L	Σ ОК	R_o	Д	ДГ	Г	Ж	К	ОС	Т
Мягкая часть до окончательного дробления	82,0	–	16,7	1,3	16,7	1,15	–	–	14,0	49,0	18,0	18,0	1,0
Твердая часть до предварительного дробления	72,4	–	27,0	0,6	27,0	0,93	–	19,0	32,0	28,0	19,0	2,0	–
Твердая часть после предварительного дробления	70,4	–	28,5	1,1	28,5	0,96	–	7,0	39,0	28,0	26,0	–	–
До окончательного дробления	82,2	–	16,1	1,7	16,1	1,08	–	1,0	26,0	44,0	18,0	10,0	1,0
После окончательного дробления	82,1	–	16,5	1,4	16,5	1,07	–	–	33,0	36,0	18,0	12,0	1,0

Таблица 7. Гранулометрический состав угольных шихт ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский коксохимический завод»

Наименование	Гранулометрический состав (мм),%					
	> 6	3–6	1–3	0,5–1,0	> 0,5	0–3
Мягкая часть до окончательного дробления	15,8	11,6	27,6	17,4	27,6	72,6
Твердая часть до предварительного дробления	53,6	9,0	15,0	8,6	13,8	37,4
Твердая часть после предварительного дробления	7,2	16,0	30,2	17,0	29,6	76,8
До окончательного дробления	30,2	10,8	23,2	14,4	21,4	59,0
После окончательного дробления	4,8	10,8	26,7	16,5	41,2	84,4

Твердая часть шихты, вследствие вовлечения в нее низкосернистых российских газовых углей, характеризуется невысокими значениями содержания серы — 0,97–0,98% и спекаемости — 10–12 мм. До предварительного измельчения данная группа углей содержала 37,4% класса менее 3 мм, после предварительного измельчения содержание класса 0–3 мм повысилось до 76,8%.

В целом, угольная шихта имеет содержание серы на уровне 1,35%, выход летучих веществ — 30,5%, толщину пластического слоя — 15–16 мм, показатель отражения витринита — 1,07–1,08%, помол до окончательно измельчения — 59,0%, а после — 84,4%.

Для разработки рациональных технологических параметров подготовки угольных шихт проведены лабораторные коксования опытных шихт с использованием лабораторной печи «Карботест». Угольные шихты были подготовленны по следующим вариантным схемам:

1. Заводской вариант шихты, отобранный после ее окончательного измельчения (вар. 1). При получении данной шихты твердая ее часть (~30%) была подроблена в отделении предварительного измельчения до содержания класса 0–3 мм 76,8% и в дальнейшем, совместно с углями мягкой группы (содержание класса 0–3 мм 72,6%) измельчена в отделении окончательного дробления до помола 84,4%.

2. Опытный вариант шихты (вар. 2). При получении данной шихты твердая ее часть (отобранная на предприятии) была подроблена в лабораторных условиях (имитация отделения предварительного

измельчения) до содержания класса 0–3 мм ~82% и, в дальнейшем, совместно с углями мягкой группы (отобранная на предприятии) с содержанием класса 0–3 мм 72,6%, измельчена до помола ~80%

3. Опытный вариант шихты (вар. 3). При получении данной шихты твердая ее часть (отобранная на предприятии) была подроблена в лабораторных условиях (имитация отделения предварительного измельчения) до содержания класса 0–3 мм ~82% и, в дальнейшем, совместно с углями мягкой группы (отобранная на предприятии) с содержанием класса 0–3 мм 72,6%, измельчена до помола ~78%.

Вар. 2 и 3 опытных шихт подготавливались с учетом необходимости, во-первых, максимально снизить крупность твердых углей и тем самым уменьшить центры трещинообразования в коксе, а во-вторых, снизить расход электроэнергии на измельчение шихты при переходе на более грубый помол (с 84,4 до 80–78%).

В табл. 8–10 приведены технологические свойства, петрографическая характеристика и гранулометрический состав опытных угольных шихт.

Данные табл. 8–10 свидетельствуют, что качество угольных шихт, в целом, находятся на близком уровне. Некоторое отличие по качественным показателям варианта 1 от варианта 2 и 3 вызвано, по всей видимости, некоторой задержкой в отборе проб.

Таблица 8. Технологические свойства угольных шихт ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский коксохимический завод»

Вариант	Технический анализ, %			Пластометрические показатели, мм	
	A^d	S^d_t	V^{daf}	x	y
1	8,2	1,46	28,9	23	15
2	8,4	1,63	30,4	25	16
3	8,6	1,62	30,1	19	16

Таблица 9. Петрографическая характеристика угольных шихт ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский коксохимический завод»

Вариант	Петрографический состав (без минеральных примесей),%					Средний показатель отражения витринита, %	Стадии метаморфизма витринита,%						
							менее 0,50	0,50–0,65	0,66–0,89	0,90–1,19	1,20–1,39	1,40–1,69	1,70–2,59
							Марки угля, условно соответствующие стадиям метаморфизма витринита						
	Vt	Sv	I	L	Σ ОК	R_o	Д	ДГ	Г	Ж	К	ОС	Т
1	76	0	21	3	21	1,02	0	11	26	32	24	7	0
2	77	0	22	1	22	1,09	0	5	23	38	20	14	0
3	82	0	17	1	17	1,07	0	4	24	42	21	9	0

Таблица 10. Гранулометрический состав угольных шихт ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский коксохимический завод»

Вариант	Гранулометрический состав (мм),%					
	> 6	3–6	1–3	0,5–1,0	> 0,5	0–3
1	6,9	12,3	33,2	9,5	38,1	80,8
2	7,5	12,5	33,1	10,0	36,9	80,0
3	8,1	13,9	31,8	8,3	37,9	78,0

Зольность угольных шихт колеблется от 8,2 до 8,6%; содержание общей серы от 1,46 до 1,63%; выход летучих веществ (на сухое беззольное состояние) от 28,9 до 30,4%; толщина пластического слоя

15–16 мм; показатель отражения витринита от 1,02 до 1,09%; содержание витринита от 76 до 82%; сумма фюзенизированных компонентов от 17 до 22%.

Составленные и подготовленные угольные шихты были прококсованы в лабораторной 5-кг лабораторной печи конструкции ГП «УХИН». Результаты исследования приведены в табл. 11.

Таблица 11. Технологические свойства кокса из шихт ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский коксохимический завод»

Наименование варианта кокса	Технический анализ, %			Выход кокса, B^d, %	Механическая прочность, %		Абразивная твердость, мг	Структурная прочность, %
	A^d	S^d_t	V^{daf}		$П_{25}$	$И_{10}$		
1	11,2	1,21	1,0	75,3	92,6	6,0	49,8	88,4
2	11,4	1,39	1,1	76,0	92,5	6,1	50,5	90,0
3	11,3	1,35	1,0	75,7	92,5	6,2	51,2	89,0

Анализируя приведенные в табл. 11 данные, можно сделать вывод, что повышение уровня измельчения твердых углей в отделении предварительного измельчения с 77 до 82% при одновременном снижении помола шихты после окончательного измельчения с 80,8 (84,4) до 78% практически не отражается на качестве получаемого кокса. Механическая прочность по показателю П25 колеблется от 92,6 до 92,5%, а истираемость по показателю И10 от 6,0 до 6,2%; показатели абразивной твердости (АТ) и структурной прочности (СП) также изменяются в диапазоне допускаемой погрешности. Необходимо также отметить, что снижение помола шихты с 80% (вар. 2) до 78% (вар. 3) не привело к существенному изменению показателей качества кокса.

На основании проведения анализа работы углеподготовительного отделения, лабораторных и опытно-промышленных исследований сформулированы следующие выводы:

1. Установлено, что входящие в сырьевую базу ПАО «ЕВРАЗ Днепродзержинский коксохимический завод» угольные концентраты существенно различаются по своим технологическим свойствам. Повышенный выход летучих веществ углей газовой группы, невысокая спекаемость, относительно высокое содержание фюзенизированных компонентов, низкое содержание зерен угля крупностью менее 3 мм, а также низкие значения коэффициента размолоспособности делают необходимым их более тонкое измельчение в сравнении с углями спекающей основы (Ж+К) и отощенными спекающимися углями.
2. Анализ ситового состава и технологических свойств углей, входящих в сырьевую базу завода показал, что мягкая часть угольной шихты характеризуется повышенными спекаемостью и показателем отражения витринита, содержание класса 0–3 мм составляет 72,6%. Твердая часть шихты, вследствие вовлечения в нее российских углей, характеризуется невысокой спекаемостью. До предварительного измельчения данная группа содержит 37,4% класса менее 3 мм, после предварительного измельчения содержание класса 0-3 мм повышается до 76,8%. В целом, угольная шихта до дробления характеризуется содержанием класса 0-3 мм на уровне 59,0%, а после — 84,4%.
3. Лабораторными и опытно-промышленными исследованиями установлено, что имеющаяся на предприятии схема подготовки угольной шихты позволяет без ухудшения качества получаемого кокса варьировать в довольно широких пределах долю углей твердой группы, поступающей в отделение предварительного измельчения, их помол, а также помол угольной шихты после ее окончательного измельчения. Полученные данные позволяют корректировать технологические параметры подготовки угольной шихты в зависимости от ее марочного и компонентного составов.

Список литературы

1. Ковалев Е.Т. Особенности формирования угольной сырьевой базы коксохимических предприятий Украины в современных условиях / Е.Т. Ковалев, И.Д. Дроздник, Ю.С. Кафтан // Углехимический журнал – 2015, № 3. – С. 8–13.
2. Мирошниченко Д.В. Оптимизация реакционной способности как интегрального показателя качества кокса / Д.В. Мирошниченко // Автореферат на соискание научной степени кандидата технических наук. Харьков. ВПЦ «Контраст». – 2006. – 20 с.
3. Улановский М.Л. Разработка и апробация математических моделей реакционной способности и термомеханической прочности кокса / М.Л. Улановский, Д.В. Мирошниченко // Углехимический журнал – 2005. – № 1–2. – С. 49–54.
4. Дроздник И.Д. Совершенствование схем подготовки углей в условиях межбассейновой сырьевой базы коксования / И.Д. Дроздник, Д.В. Мирошниченко, В.М. Ладыжинский, Ю.В. Бессчастный, Н.И. Топоркова // Углехимический журнал – 2010. – № 3–4. – С. 17–24.

А.В. Козуб, А.И. Панченко, АО «МГОК», Н.Т. Эфендиев,
Р.И. Исмагилов, УК «Металлоинвест»
А.А. Солодухин, В.А. Горбачев, ООО «НПВП ТОРЭКС»
Ю.А. Чесноков, УрО РАН

УПРАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ КАК ОСНОВА СТРАТЕГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Целью работы является обоснование новых принципов управления качеством железорудных окатышей за счет контроля показателей восстановимости, температурного интервала размягчения и прочности при восстановлении. На примере окатышей ОАО «Михайловский ГОК» показано, что за счет такого подхода возможно существенно повысить эффективность доменной плавки. Предложено учитывать восстановимость, прочность при восстановлении и температурный интервал размягчения при расчете закупочной цены железорудных окатышей, что позволит стимулировать повышение эффективности горнорудного и металлургического производств.

Конкуренция на внутреннем и международном рынках железорудного сырья определяет необходимость разработки и реализации новых технологических решений, обеспечивающих повышение технико-экономических показателей его производства и, соответственно, снижение его стоимости. Другим фактором, определяющим конкурентоспособность продукта, является комплекс качественных показателей, которые обычно зафиксированы в технических условиях (ТУ) производителя. От качества окатышей в существенной степени зависит удельный расход наиболее дорогостоящего компонента доменной шихты — металлургического кокса, а также удельный расход природного газа в установках металлизации. Этот факт, на фоне постоянно-

го удорожания энергоресурсов, обуславливает актуальность повышения качества и металлургических свойств железорудных окатышей.

Показатели качества, указанные в технических условиях на продукцию — содержание мелочи в окатышах, химический состав, прочность на сжатие и барабанная проба (ударная прочность и истираемость), хотя и дают информацию о механических и транспортных характеристиках железорудного сырья, но далеко не в полной мере определяют показатели доменной плавки. Более того, в трудах Уральской школы металлургов под руководством проф. С.В. Шаврина показано [1], что этих данных недостаточно для обоснованного выбора оптимальных режимных параметров доменной плавки. Более того, заключения об устойчивой взаимосвязи показателей качества окатышей с их свойствами при восстановлении сделать, вообще говоря, нельзя [2]. Более информативными, с точки зрения влияния на показатели производства чугуна, являются металлургические свойства:

- индекс низкотемпературного разрушения (LTD);
- восстановимость;
- температура начала размягчения и температурный интервал размягчения.

Приоритетность каждого из них зависит от индивидуальных особенностей доменной печи, железорудного сырья и условий плавки. Оценка металлургических свойств окатышей производится, как правило, эпизодически, в рамках исследовательских работ. В то же время, контроль металлургических свойств в режиме «онлайн» при использовании математических моделей позволяет существенно облегчить контроль доменного процесса и повысить эффективность управления плавкой, что, в конечном итоге, создает предпосылки для экономии дорогостоящего кокса и снижения интегральной себестоимости чугуна.

Изложенное определяет целесообразность формирования несколько иных принципов, лежащих в основе организации производства чугуна и контроля качества железорудного сырья, — наряду со снижением себестоимости окатышей необходимо контролировать требуемый спектр металлургических свойств продукта, который, в свою очередь, обеспечит улучшение технико-экономических показателей производства чугуна конкретных потребителей. Разработка и обоснование этих принципов составляет цель настоящей работы, для достижения которой рассмотрены следующие вопросы:

1. Определение комплекса металлургических свойств опытных окатышей АО «Михайловский ГОК».
2. С использованием логико-статистической модели — проведение сравнительной оценки показателей доменной плавки и повышения эффективности производства чугуна в условиях, например, АО «Уральская Сталь».
3. Обоснование пути дальнейшего повышения эффективности доменного процесса за счет оптимизации свойств шихтовых материалов и модернизации системы контроля их качества.

Эффективность доменного процесса в значительной степени зависит от высокой газопроницаемости столба шихтовых материалов, способствующей хорошему контакту газовой и твердой фаз в сухой части шахты доменной печи. При этом высокая газопроницаемость слоя достигается при использовании материалов шихты с узким гранулометрическим составом, высокими значениями «холодной» и «горячей» прочности, высокой степени восстановимости железорудной составляющей шихты. Для уменьшения газодинамического сопротивления в области зоны когезии (область вязкопластичного состояния шихты) также требуются высокие значения температуры начала и конца размягчения и, по возможности, наименьший интервал размягчения.

В таблице 1 представлены результаты исследования металлургических свойств опытных окатышей ОАО «Михайловский ГОК», за период с февраля 2015 по январь 2016 г. Исходным материалом шихты являлся магнетитовый концентрат.

В частности, в таблице 1 приведены исследования следующих параметров:

- Прочности после низкотемпературного восстановления LTD по ISO 13930;
- Восстановимости по ГОСТ 17212-84;
- Интервала размягчения по ГОСТ 26517-85.

Как и ранее [3], результаты исследований свидетельствуют в целом о достаточно высоких металлургических свойствах окатышей ОАО «Михайловский ГОК».

Таблица 1. Результаты исследований металлургических свойств окатышей за период март 2015 г. — февраль 2016 г.

N п/п	1		2		3		4		5		6		7	
	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
Дата проведения исследований	Февраль **2015**	Февраль 2015	Апрель 2015	Апрель 2015	Апрель 2015	Апрель 2015	Сентябрь 2015	Сентябрь **2015**	Октябрь 2015	Октябрь 2015	Ноябрь 2015	Ноябрь 2015	Январь 2016	Январь 2016
Восстановимость, %	72,06	59,83	64,04	53,66	51,96	62,31	64,48	56,98	53,69	64,83	51,22	66,63	71,77	59,08
LTD +6,3	97,44	97,40	96,49	96,87	98,39	97,48	93,81	98,35	96,64	98,12	97,82	98,87	97,62	97,97
LTD –3,15	1,85	2,01	2,78	2,34	1,23	2,00	4,98	1,31	2,67	1,26	1,45	0,96	2,11	1,19
LTD –0,5	1,65	1,89	2,644	2,22	1,11	1,88	4,71	1,06	2,41	1,03	1,33	0,88	1,94	1,00
Температура начала размягчения, °С	1180	1190	1170	1160	1200	1180	1290	1300	1225	1250	1210	1230	1190	1210
Температура конца размягчения, °С	1330	1320	1310	1320	1320	1300	1370	1395	1350	1300	1330	1335	1320	1370
Интервал размягчения, °С	150	130	140	160	120	120	80	95	125	50	120	105	130	160

а — класс крупности 12–16 мм, б — 10–12 мм

По индексу низкотемпературного разрушения окатыши демонстрируют низкие показатели разрушаемости — 1,1–1,8% (кл. — 0,5 мм). Для сравнения, соответствующие показатели для окатышей Стойленского, Качканарского комбинатов и ОАО «Карельский окатыш» составляют 4,0; 4,5 и 4,3%, соответственно. Выход класса +6,3 мм является высоким, достигая 97–98%, что свидетельствует о низкой разрушаемости исследуемых окатышей при восстановлении.

При этом с увеличением среднего размера окатышей от 11,0 до 14,0 мм показатель прочности (кл. +6,3 мм) незначительно увеличивается, как и кл. — 0,5 мм — с 1,0 до 1,9% эти показатели могут обеспечить высокую газопроницаемость столба шихты в верхних горизонтах шахты доменной печи.

Анализ результатов исследования восстановимости опытных проб окатышей позволяет сформулировать следующие выводы:

1. С ростом среднего размера окатыша от 11,0 до 14,0 мм его восстановимость увеличивается с 59 до 72%. Это соответствует основным положениям теории восстановительных процессов.
2. Общий уровень показателя восстановимости является недостаточным. Так, для сравнения, соответствующий показатель для других горно-перерабатывающих предприятий (перечисленных выше) превышает 78,0–80,0%.
3. Показатели восстановимости и прочности при восстановлении находятся в альтернативной взаимосвязи. Это также соответствует теории восстановительных процессов [4–6].

Результаты исследований температур начала размягчения и температурного интервала размягчения свидетельствуют:

1. Выявленные температурные интервалы размягчения для «крупных» окатышей (12–16 мм) составляет 130°С, что не вполне допустимо и позволяет прогнозировать длинную зону когезии в доменной печи и низкие газодинамические свойства столба шихты. Окатыши более мелкой фракции (10–12 мм) показывают еще более расширенный температурный интервал размягчения — 161°С.

Расчетный анализ работы доменных печей позволяет прогнозировать высокие технико-экономические показатели при значениях исследуемого показателя не более 100°С [1, 2, 7].

2. Желательная температура начала размягчения с позиции теории доменного процесса составляет 1230–1240 °С. Этим условиям не удовлетворяют окатыши исследуемых проб. Это определяет незначительный сдвиг зоны когезии вверх шахты доменной печи.

В ходе исследований металлургических свойств представлял интерес сравнительный анализ свойств окатышей, отобранных в зимний и летний периоды, а также при наличии или отсутствии офлюсования. Основные результаты этого анализа представлены ниже (табл. 1), из чего следует:

1. Неофлюсованные окатыши крупной фракции (а) обычно имеют большую восстановимость, что связано с большими значениями напряженного состояния при восстановлении и более интенсивным образованием новых реакционных поверхностей.
2. Офлюсованные окатыши демонстрируют обратную зависимость восстановимости от диаметра (пробы 5 и 6), что связано с большим количеством жидкой фазы, формируемой при обжиге, что снижает диффузионный поток газа-восстановителя к реакционным поверхностям.

В целом, офлюсованные окатыши имеют совершенно недостаточные значения восстановимости, что может привести к снижению эффективности доменного процесса.

3. По индексу низкотемпературного разрушения, как офлюсованные, так и неофлюсованные окатыши демонстрируют высокие качественные показатели независимо от времени отбора (летнего или зимнего).
4. По температурному интервалу размягчения офлюсованные окатыши характеризуются более низкими значениями (100–120°С), чем офлюсованные (130–160°С), что связано с более развитыми процессами минералообразования при обжиге. Однако общий фон значений этого показателя превышает в обоих случаях оптимальные для доменной плавки значения — до 110°С.
5. Периоды отбора (летний и зимний) влияют лишь на величину температурного интервала размягчения проб окатышей: в теплый период производства окатышей перепад температур верха и низа слоя уменьшается, что приводит к более завершенной термообработке нижних горизонтов слоя и, следовательно, полному завершению процессов минералообразования в связке окатышей.

Полученные данные позволят более направленно формировать приоритетные металлургические свойства обожженных окатышей для конкретных потребителей. Приоритет того или иного показателя может быть определен из анализа доменного процесса с помощью логико-статистической модели с использованием данных работы конкретных доменных печей. Результаты этих исследований и их сравнительный анализ приведены ниже.

Следующим этапом работы явилась адаптация логико-статистической модели к условиям работы конкретной доменной печи (ДП), в качестве которой будет рассмотрена ДП№3 АО «Уральская Сталь». Далее, на этой основе, расчетным методом предусмотрен сравнительный анализ показателей доменной плавки при изменении металлургических свойств окатышей АО «МГОК» (свойства используемого агломерата задаются неизменными):

- восстановимости;
- температурного интервала размягчения.

Для решения поставленной задачи по анализу металлургических свойств сырья на технико-экономические показатели доменной плавки в качестве сравнения была выбран период работы доменной печи № 3 в феврале 2015 г. Анализ технико-экономических показателей работы печи был проведен с использованием логико-статистической модели ИМЕТ УрО РАН [1], позволяющей выявлять влияние свойств сырья и состава шихты на показатели работы печи. В качестве исходных данных для анализа были использованы усредненные характеристики материалов (февраль 2015 г.), указанные в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Химический состав рудных компонентов, масс. %

Материал	$Fe_{общ}$	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	P_2O_5	SO_3
Окатыши МихГОКа	63,50	0,93	8,38	0,14	0,63	0,46	0,02	0,04	0,01
Агломерат Уральская Сталь CaO/SiO_2 = 1,81	51,50	10,70	8,30	0,95	15,00	1,50	0,14	0,05	0,02

Таблица 3. Металлургические характеристики рудных компонентов, %

Параметр	Окатыши МихГОК	Агломерат Уральская Сталь
Восстановимость по ГОСТ 17212-84, %	60,5	62,3
Горячая прочность по YSO 13930, %	97,4	55,4
Холодная прочность по ГОСТ 15137-77, %	93,20	74,25
Температура начала размягчения, °С	1185	1219
Температура плавления, °С	1325	1346
Содержание мелочи (кл. — 5мм), %	3,5	16,0

Согласно методике исследования, первоначально формировался базовый вариант расчета, основанный на технических отчетах работы доменных печей за февраль 2015 г. В таблице 4 приведены основные сравнительные характеристики ТЭП расчетного базового варианта и фактических показателей работы печи.

Критерием сравнения с базовым вариантом являлось качество металла, поэтому за основу было взято постоянство содержания серы и кремня в чугуне. Соответствие расчетного и базового вариантов в части основных показателей (табл. 4) позволяет считать используемую логико-статистическую модель полностью адаптированной к условиям работы доменной печи №3 АО «Уральская Сталь».

Это позволяет достаточно надежно определить показатели доменной плавки при изменении металлургических свойств окатышей «МГОК». В качестве примера рассмотрен вариант увеличения восста-

новимости на 10% абс (↑10%В) и уменьшения интервала размягчения на 24°С (↓ΔТ 24°С). Увеличение показателя низкотемпературного разрушения по классу +6,3 мм не анализировалось по причине его высоких значений для исследуемых окатышей: 95–98 %.

Таблица 4. Показатели доменной плавки для условий ОАО «Уральская Сталь» (февраль 2015 г.)

Показатель	ДП № 3	
	Базовый расчетный	Факт
Полезный объем печи, м³	1513	
Производительность, т/сут	3090	3089
Общий расход руды, кг/т чуг	1749	1818
Среднее содержание Fe, %	55,6	54,1
Расход кокса, кг/т чугуна	452,9	453,0
Дутье:		
количество, м³/т чуг.	1140	1142
Колошниковый газ:		
выход, м³/т чуг.	1711	н.д.
температура (влж), ° С	192	н.д.
Выход шлака, кг/т чуг	401	389
Основность CaO/SiO_2	1,11	1,09

Таблица 5. Результаты моделирования доменной плавки

Показатель	Ед. изм.	База	↑10% В	↓ΔТ = 24°С
Полезный объём печи	м³		1 513	
Производительность печи	т/сут	3 090	3 145	3 164
Общий расход руды	кг/т чуг	1 749	1 749	1 749
Агломерат УС 2015	кг/т чуг	1 142,2	1 142,3	1 142,2
Окатыши МихГОК 2015	кг/т чуг	606,9	607,1	606,9
Флюс	кг/т чуг	7,07	4,17	7,29
Кокс УС 2015	кг/т чуг	452,9	440,3	450,3
Среднее содержание Fe в руде	%		55,7	
Выход пыли	кг/т чуг	22,2	22,0	22,2
Расход газообразного топлива	м³/т чуг	95	95	95
Дутье				
Количество	м³/т чуг	1 140	1 117	1 142
температура	град. С	1 117	1 117	1 117
кислород	%	25,40	25,40	25,40
Колошниковый газ				
Выход	м³/т чуг	1 711	1 669	1 716
давление	ати	1,26	1,26	1,26
температура	град. С	191,65	187,11	193,27
теплотворная способность	кДж	3 730	3 613	3 747

Продолжение табл. 5

Показатель	Ед. изм.	База	↑10% В	↓ΔT = 24°C
CO	%	23,87	23,00	23,98
CO_2	%	19,70	20,42	19,62
H_2	%	6,60	6,53	6,63
Теоретическая температура горения	град. С	2 041	2 033	2 041
Состав чугуна:				
[Si]	%	0,64	0,64	0,64
[S]	%	0,017	0,017	0,017
[Mn]	%	0,131	0,13	0,131
[P]	%	0,055	0,055	0,056
[C]	%	4,513	4,514	4,513
Состав шлака:				
(CaO)	%	45,915	45,858	45,915
(MgO)	%	5,397	5,409	5,396
(SiO_2)	%	40,105	40,207	40,099
(Al_2O_3)	%	5,891	5,845	5,897
(MnO)	%	0,021	0,021	0,021
(FeO)	%	0,609	0,61	0,607
(R_2O)	%	1,422	1,417	1,423
(S)	%	0,612	0,601	0,614
Основность (CaO)/SiO_2	%	1,145	1,141	1,145
Выход шлака	кг/т чуг	401	398	401

Как видно из представленных данных, повышение металлургических свойств является существенным резервом для повышения эффективности доменной плавки, позволяющем снизить удельный расход кокса на 12 кг/т (2,6 %) и повысить производительность на 74 т/сут. (2,4 %). Поэтому контроль этих показателей в режиме «онлайн» и, при необходимости, корректировка режимов производства окатышей являются актуальными задачами, решение которых требует внедрения новых принципов взаимодействия между производителями и потребителями окатышей. В частности, необходимо:

1. Увеличить перечень контролируемых, согласно техническим условиям на окатыши, параметров качества, дополнив их показателями металлургических свойств.
2. Учитывать металлургические свойства при расчете закупочной цены железорудных окатышей, что позволит дополнительно стимулировать производителя.

Реализация указанных принципов повлечет дополнительные расходы на организацию контроля металлургических свойств и поиск путей их улучшения со стороны поставщика окатышей, а также повышение затрат на закупку более качественного сырья со стороны металлургов. Эти издержки будут скомпенсированы за счет снижения себестоимости чугуна, что позволяет считать предлагаемые принципы повышением глубины кооперации горно-обогатительных и металлургических предприятий, особенно актуальными для вертикально-интегрированных холдингов, имеющих в активе добывающие и перерабатывающие производства. В этом случае результирующий положительный эффект будет получен от экономии на стадии производства чугуна и распределен внутри структуры холдинга.

Разработке технических и технологических решений, направленных на повышение и оптимизацию комплекса металлургических свойств окатышей будут посвящены дальнейшие исследования специалистов АО «Михайловский ГОК», ООО «НПВП ТОРЭКС» и ИМеТ УрО РАН.

Список литературы

1. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса / Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В., М: Наука, 1991, 91 с.
2. Создание методических основ анализа влияния качественных характеристик железорудного сырья и кокса на технико-экономические показатели доменного процесса / Дмитриев А.Н., Витькина Г.Ю., Чесноков Ю.А. // Физическая химия и технология в металлургии Сборник трудов, посвященный 60-летию ИМЕТ УрО РАН. Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук. Екатеринбург, 2015. с. 309–314.
3. Оптимизация состава и структуры окатышей — резерв повышения их металлургических свойств / Бруев В.П., Евстюгин С.Н., Кретов С.И., Сапожникова Т.В., Шаврин А.В., Шаврин С.В. / Сталь, 2003, № 9, с. 5–7.
4. Алексеев Л.Ф., Горбачев В.А., Кудинов Д.З., Шаврин С.В. Структура и разрушение окатышей при восстановлении. М., Наука, 1983, 98 с. с илл.
5. Багданди Л.Ф., Энгель Г.Ю. Восстанговление железных руд. М.: Метллургия, 1971. 520 с.
6. 6.Макрокинетика восстановления железорудных материалов газами. Математическое описание / Абрамов С.Д., Алексеев Л.Ф., Кудинов Д.З., Ченцов А.В., Шаврин С.В. М.: Наука, 1982, 104 с.
7. Контролируемые параметры доменного процесса и его моделирование / Чесноков Ю.А., Беляев И.Л., Шаврин С.В. // Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии Труды 2-й Всероссийской научно-практической конференции, 2006. с. 333–335.

А.А. Елисеев, Т.В. Деткова, В.Ю. Кучин, ПАО «Северсталь»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ГОРЯЧЕЙ ПРОЧНОСТИ АГЛОМЕРАТОВ РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

В работе выполнен поиск взаимосвязи индекса измельчения после восстановления ($RDI_{-3.15}$), характеризующего горячую прочность железорудных агломератов в соответствии с ИСО 4696-1, и их химическим составом, сведенным к одному значению — показателю основности.

Высокие требования современного доменного процесса к качеству железорудного сырья определяют необходимость контроля не только привычных характеристик (химический состав, барабанная прочность, количество мелочи в скипе), но и тех, что дают представление о поведении материала при восстановлении, т.е. горячей прочности.

Одним из способов определения прочностных характеристик железорудных материалов в восстановительной атмосфере является метод RDI [1, 2]. По условиям проведения теста проба материала массой 500 г и крупностью от 10,0 до 12,5 мм восстанавливается потоком газа (CO — 20%, CO_2 — 20%, H_2 — 2%, N_2 — 58%) в неподвижном слое при температуре 500°C. Данный метод применяется для испытаний кускового железорудного материала: железной руды, окатышей и агломерата.

Схема установки для проведения восстановления железорудного материала представлена на рис. 1.

Изменение температурного режима и состава газовой фазы за время проведения теста представлено на рис.2.

Восстановленный и охлажденный образец извлекается из реторты, после чего проводится испытание на прочность во вращающемся барабане (внутренний диаметр 130 мм, длина — 200 мм, с двумя продольными подъемными элементами высотой 20 мм) при частоте вращения 30 об/мин и количестве оборотов — 300.

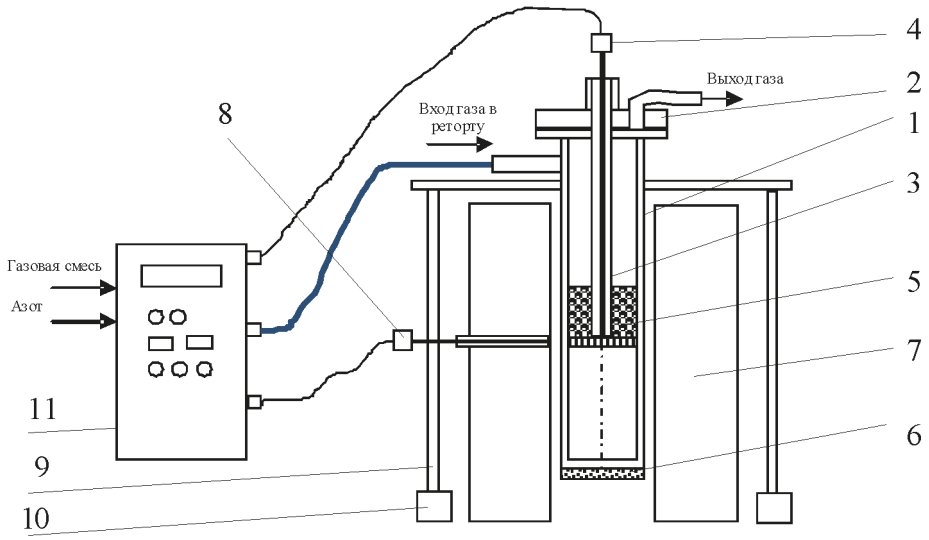


Рис. 1. Схема установки: 1 — реторта; 2 — крышка; 3 — прободержатель; 4 — термопара; 5 — навеска материала; 6 — засыпка керамических шариков; 7 — электропечь; 8 — сигнальная термопара; 9 — штатив; 10 — тензодатчики; 11 — блок управления

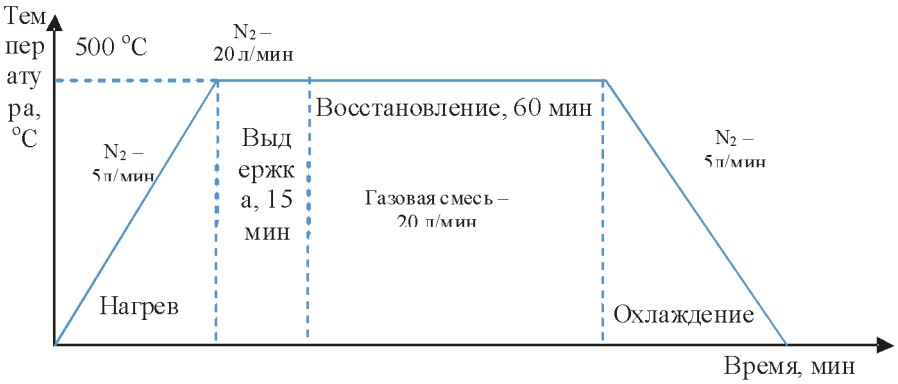


Рис. 2. Схема термограммы испытания с указанием газовой фазы

Показатель прочности после восстановления (RDI-1) вычисляется как количественная мера степени измельчения железорудного материала, который был восстановлен, затем повергнут испытанию на прочность во вращающемся барабане: процентное соотношение масс материала крупностью более 6,3 мм, менее 3,15 мм и менее 500 μм, соответственно, к общей массе образца после восстановления и перед вращением в барабане:

- индекс прочности — $RDI_{+6.3} = \frac{m_1}{m_0} \cdot 100;$
- индекс измельчения — $RDI_{-3.15} = \frac{m_0 - (m_1 + m_2)}{m_0} \cdot 100;$
- индекс истирания — $RDI_{-0.5} = \frac{m_0 - (m_1 + m_2 + m_3)}{m_0} \cdot 100;$

где m_0 — масса образца в граммах после восстановления и перед испытанием во вращающемся барабане; m_1, m_2 и m_3 — масса в граммах фракции, оставшейся соответственно на ситах 6,30 мм, 3,15 мм и 500 μм.

Выполнение теста довольно затратное мероприятие и занимает продолжительное время (порядка 4-х часов), а с учётом временного запаздывания на отбор, доставку и подготовку накопительной пробы

оперативность корректировок доменного процесса на основании полученной информации довольно низкая. К тому же всё более возрастающая потребность использования характеристик горячей прочности железорудного сырья для прогноза и поиска оптимальных шихтовок доменной плавки ставит задачу вероятностной оценки изменения данного показателя для определённых условий. Таким образом, проведение испытаний по определению металлургических свойств железорудного сырья должно быть направлено в том числе и на выполнение исследовательских функций с накоплением информации о свойствах материалов, что позволит вести поиск закономерностей и определить влияния показателей химического и минералогического состава агломератов на прочностные характеристики.

Целью настоящего исследования являлось выявление общей закономерности влияния химического состава агломерата (который в свою очередь зависит от множества сырьевых и производственных факторов) на прочностные характеристики агломерата после восстановления.

Значимость данного направления отмечалась исследователями ранее. Так, в работе [3] приведены данные о корреляции показателей RDI (по ГОСТ 27446-87) с показателями доменной плавки: «повышение показателя $RDI_{+3,15}$ приводит к снижению расхода кокса на 2 кг/т чугуна и повышению производительности доменной печи на 0,6%[1]». Определение аналогичных показателей по ИСО 4696-1 [2] широко применяется рубежом [4, 5, 9, 10].

Зарубежные требования к качеству агломерата по показателю $RDI_{+3.15}$ — должен быть не менее 70%, а относительно окатышей — не менее 90% (или, относительно показателя $RDI_{-3.15}$ — для агломерата менее 30% (менее 20% — по работе [6]), а для окатышей — менее 10%).

В работах Кобелева В.А. и Пузанова В.П. [3, 11] отмечено, что свойства силикатно-оксидных расплавов определяются их кислотно-основными характеристиками: «В основу показателей потребительских свойств искусственных структур (агломератов и окатышей), полученных на базе жидкофазных процессов, должны быть положены показатели кислотно-основных свойств, в частности, показатель кислотности поликомпонентных расплавов $\beta_{кисл}$ (или $\beta_{осн}$), одновременно являющийся количественной (массовой или объемной) мерой химического состава структуры.»

Для шестикомпонентного расплава базовые показатели химического состава материала $\beta_{кисл}$ и $\beta_{осн}$ имеют следующий вид:

$$\beta_{кисл} = \frac{48(Fe_2O_3 + Al_2O_3) + 32SiO_2 + 16(FeO + CaO + MgO)}{112Fe_2O_3 + 54Al_2O_3 + 28SiO_2} = \frac{\sum O_2^{окс}}{\sum K^{кисл.\ окс}}, \quad (1)$$

$$\beta_{осн} = \frac{112Fe_2O_3 + 54Al_2O_3 + 28SiO_2 + 56FeO + 40CaO + 24MgO}{16(FeO + CaO + MgO)} = \frac{\sum K^{окс}}{\sum O_2^{кисл.\ окс}}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) используется способ сворачивания химического состава поликомпонентных веществ — по количеству атомов. Расчет данных показателей для агломератов в производственных условиях не представляет трудностей, так как основывается на результатах химического анализа (экспресс анализа).

Массовая доля Fe2O3 может быть определена как:

$$Fe_2O_3 = 160/112 \cdot (Fe_{общ} - FeO \cdot 56/72).$$

Варьирование представленных показателей в производственных условиях может быть вызвано изменением шихтовых условий, таких как:

- задаваемое соотношение CaO/SiO_2 (основность) в агломерате;
- ввод различных добавок в шихту (конвертерный шлак, сталеплавильные и прокатные шламы, окалина и др.);
- изменение железорудной части шихты (использование в шихте других видов сырья, что является весьма актуальным в настоящее время как для ЧерМК ОАО «Северсталь», так и для других предприятий отрасли, особенно если отсутствует собственная сырьевая база).

[1] Авторы работы [3] ссылаются на работу: Петерс К.Х., Бееп Г., Беппер Э. и др. Получение и переплав агломерата с низким содержанием кремнезема//Черные металлы, 1989. № 22, с. 11–18.

Кроме того, на величину показателей (1) и (2) оказывает влияние и степень развития окислительно-восстановительных процессов при тех или иных условиях спекания (через значение массовой доли FeO), которая в свою очередь зависит от множества факторов: состав и свойства шихтовых материалов, тепловой уровень процесса, свойства твердого топлива.

Как было отмечено выше, показатели основности и кислотности определяют потребительские свойства агломератов, одним из которых и являются показатели измельчения в условиях низкотемпературного восстановления.

Поиск корреляции между показателем $RDI_{-3.15}$ и показателем основности агломерата (2) выполнен по результатам определений горячей прочности для промышленных агломератов АГЦ-2 и АГЦ-3 ЧерМК, а также для лабораторных агломератов различных серий спеканий с изменением шихтовых условий и технологических параметров процесса агломерации.

Значения показателя $RDI_{-3.15}$ определены в Центре исследования сырья Коксоаглодоменного производства ЧерМК ПАО «Северсталь» в соответствии с ИСО 4696-1. Выполненный обзор источников литературы позволил собрать некоторые данные о свойствах высокоосновных агломератов производимых на аглофабриках NSC — Япония, Tata Steel — Индия [7], Thyssen Krupp Stahl AG — Германия, Rautaruukki Oyi — Финляндия [4] (средние значения по химическому составу и показателю измельчения $RDI_{-3.15}$) и China Steel Corporation — Китай [10], а также промывочного и офлюсованного агломератов НЛМК [8].

В работе [9] добавку MgO осуществляли в виде доломита. В результате проведения испытаний лабораторных агломератов установлено, что увеличение массовой доли MgO в агломератах основностью 1,36 и 1,73 ед. с 1,3 до 3,0% привело к существенному снижению $RDI_{-3.15}$. Варьирование массовой доли Al_2O_3 в работе [10] осуществляли путем использования при агломерации руд разных месторождений Южной Америки и Австралии. В ходе испытаний следующие показатели оставались на одном уровне: CaO/SiO_2 = 1.73, SiO_2 = 5.5% (масс.), MgO = 1.9% (масс.). Изменению были подвержены массовая доля FeO (4,5–9,5%) и Al_2O_3 (0,90–2,69%) в агломерате. В связи с этим влияние оксида алюминия на $RDI_{-3.15}$ было не однозначно, однако получена зависимость между долей Al_2O_3 и прочностными характеристиками агломерата после восстановления. При увеличении доли руд с повышенным содержанием оксида алюминия наблюдалось увеличение разрушения после восстановления $RDI_{-3.15}$.

Полученные взаимосвязи индекса измельчения после восстановления $RDI_{-3.15}$ и показателя основности (2) представлены на рис. 3.

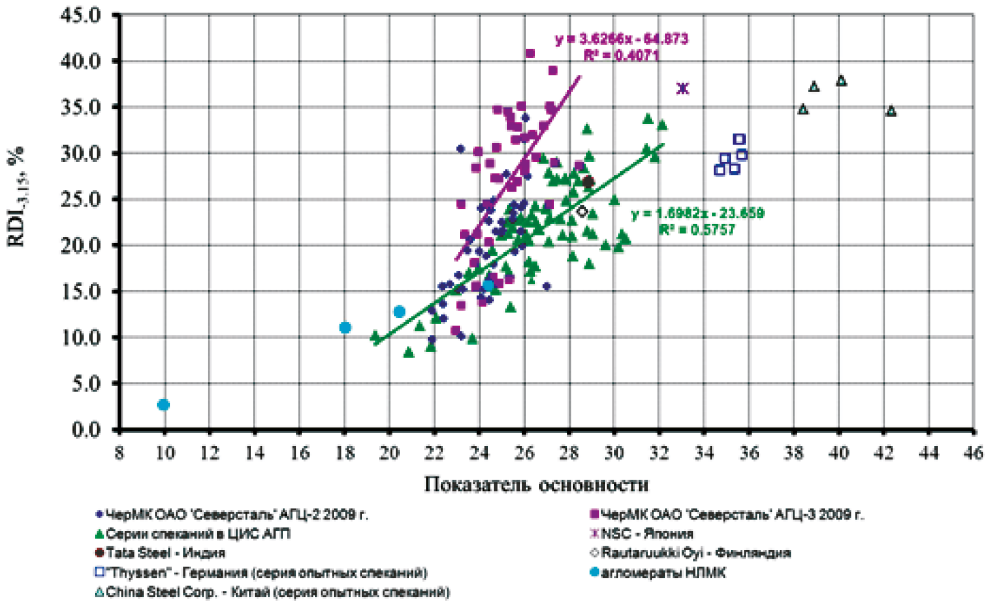


Рис. 3. Влияние показателя основности агломерата на измельчение агломерата после восстановления

Общая закономерность влияния показателя основности на коэффициент измельчения после низкотемпературного восстановления на основании исспытаний лабораторных агломератов представлена на рис. 4.

Зависимость показателя измельчения после низкотемпературного восстановления по ИСО 4696-1 — ($RDI_{-3.15}$) — от показателя основности силикатно-оксидного расплава, определенного по формуле (2) характеризуется высоким значением величины достоверности аппроксимации ($R^2 = 0.68$), что говорит об удовлетворительном согласовании рассматриваемых характеристик.

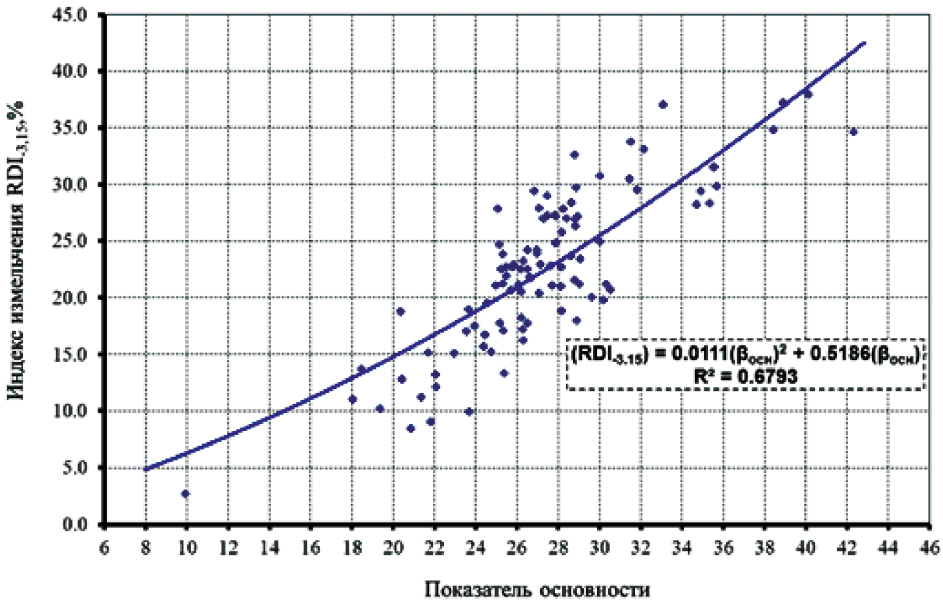


Рис. 4. Влияние изменения показателя основности агломерата на индекс измельчение после восстановления (RDI-3,15 по ИСО 4696-1)

Из рис. 4 видно, что изменение показателя основности силикатно-оксидного расплава для агломерата железорудного агломерата на единицу приводит к соответствующему изменению индекса измельчения после восстановления ($RDI_{-3.15}$) в среднем на 0,83% по абсолютной величине.

Таким образом, на основании накопленного банка данных о металлургических свойствах железорудных агломератов, полученных при разных условиях, получена общая закономерность влияния характеристик их химического состава на один из весьма значимых показателей горячей прочности $RDI_{-3.15}$, характеризующего степень измельчения материала после восстановления и связанного с параметрами доменного процесса (расходом кокса и производительностью). Полученная зависимость может быть использована как для извлечения оперативной информации о горячей прочности производимого агломерата, а, следовательно, и для проведения необходимых технологических корректировок для оптимизации условий доменного процесса, так и для прогнозных оценок изменения технико-экономических показателей доменной плавки при вариациях сырьевых условий и технологических приёмов агломерации.

Список литературы

1. ГОСТ 27446-87 Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения прочности после статического восстановления при низких температурах.
2. ИСО 4696-1:1996 Руды железные — статическое испытание на измельчение в условиях восстановления при низких температурах. Часть 1: «Реакция с CO, CO_2 и H_2».
3. Пузанов В.П. Кобелев В.А. Введение в технологии металлургического структурообразования / В.П. Пузанов / Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 501 с.

4. Исследование прочности агломерата при восстановлении на аглофабрике «RAUTARUUKKI OYI» // Новости черной металлургии за рубежом, № 6, 2006 (реф. Л.И. Александров).
5. Х. Дельвиг, В. Хартиг, М. Хоффманн, Х.Б. Люнген / Разработки в области агломерации / Х. Дельвиг // Черные металлы, ноябрь 2007 (№ 11), с. 24–32.
6. Л. Гоулд, О.Паммер, Г. Пиллмаир, Г. Штясны, Й. Вурм / Идеальный агломерат — мечта доменщика / Л. Гоулд // Бюллетень НТИ «Черная металлургия», № 10, 2003, с. 58–63.
7. Evolution of sinter quality at «Tata Steel» / U.S. Yadav, A. Ranjan, B.K. Das et al. // 5th Europ. Coke and Ironmaking Conf. 2005. 2. Tu9:2. С. 1–15. Опыт производства высокоосновного агломерата на фирме «TATA STEEL» // Новости черной металлургии за рубежом, №6, 2006 (реф. Л.И. Александров).
8. И.Ф. Курунов, Э.М.Щеглов, В.Н. Титов, А.И. Кононов, Д.Н. Тихонов, Т.Я. Малышева, О.Г. Большакова / Исследование металлургических свойств брикетов из техногенного и природного сырья и оценка эффективности их применения в доменной плавке/ И.Ф. Курунов // Бюллетень НТИ «Черная металлургия», № 12, 2007, с. 39–48.
9. F. Shen, X. Jiang, G. Wu, G. Wei, X. Li, Y. Shen / Proper MgO Addition in Blast Furnace Operation / F. Shen // ISIJ International, Vol. 46 (2006), No. 1, pp. 65–69.
10. Li-Heng Hsieh / Effect of Raw Material Composition on the sintering Properties / Li-Heng Hsieh // ISIJ International, Vol. 45 (2005), No. 4, pp. 551–559.
11. В.П. Пузанов, В.А. Кобелев / Основы теории неравновесного состояния агломерационного процесса и структурной неоднородности офлюсованных железорудных агломератов (Сообщение 1) Степень неравновесности офлюсованных железорудных агломератов, инструменты и анализ их свойств/ В.П. Пузанов // Бюллетень НТИ «Черная металлургия», № 5, 2013, с. 21–34.

Т.Я. Малышева, В.Б. Горбунов, Г.С. Подгородецкий, С.А. Писарев, НИТУ «МИСиС»

РОЛЬ ЖЕЛЕЗА МАГНЕТИТА В АГЛОМЕРАЦИИ КАК РАЗВИТИЕ ГЕОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРОЦЕССЕ

Понятие геометаллургии, активно развиваемое в настоящее время, предполагает синтез геологической информации и информации по дроблению и обогащению для создания пространственной прогнозной модели рудного тела с целью оптимизации последующих производственных процессов [1]. Отметим, что «металлургическая» составляющая данного понятия ограничивается знаниями о поведении рудных минералов и вмещающих пород в процессах дробления (измельчения) и обогащения. По нашему мнению, этот подход сужает понятие геометаллургического знания и должен быть расширен областью знаний о поведении минералов в процессах окомкования и термической обработки обогащенной руды.

Роль вмещающих пород при окускovании достаточно хорошо изучена и обобщена в работах российских исследователей [2, 3, 4]. Наиболее ярко роль вмещающих пород наблюдается при производстве окатышей из концентратов руд различного генезиса. Влияние термических свойств вмещающих пород руд скарнового типа и железистых кварцитов на металлургические свойства обожженных окатышей наиболее полно сформулированы в работах [4, 5]. В агломератах, в виду их более сложного состава по количеству компонентов шихты, роль вмещающих пород выражена менее ярко, тем не менее, она также существенна. По результатам приведенных исследований следует, что характер физико-механических свойств готовой продукции определяется составом и свойствами минеральных связок. Однако, анализ фазового состава связок на примере спекания агломератов из концентратов руд одного генезиса, какими являются концентраты из руд скарнового типа (Магнитогорский МК) и Ковдорского месторождения (Череповецкий МК) [6–8] дал основание предположить, что

существенную роль в процессе минералообразования при спекании играет структура рудной фазы — магнетита.

Магнетиты железорудных магматических месторождений в зависимости от природных условий образования характеризуются в основном гомогенным строением с минимальным количеством в их составе посторонних примесей, реже гетерогенным строением, когда изоморфные примеси находятся в составе кристаллов магнетита как продукты распада твердых растворов в форме микровключений. Методом электронной микроскопии было установлено [9], что магнетит Ковдорского месторождения имеет гетерогенное строение и представляет собой продукт распада твердых растворов. В его кристаллах элементы изоморфных примесей существуют в виде механических микрофаз типа герценита, шпинели, ульвошпинели, каждая из которых имеет отличные от матрицы магнетита физико-химические свойства. Химический состав природных кристаллов магнетита Ковдорского месторождения по данным рентгеноспектрального микрозондирования представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав кристалла магнетита гетерогенного строения по данным рентгеноспектрального микрозондирования

Точки	Fe_2O_3	MgO	Na_2O+K_2O	Al_2O_3	SiO_2	CaO	TiO_2	V_2O_5	MnO
1	61,26	7,9	0,45	1,7	–	0,2	0,8	0,4	1,0
2	62,24	7,6	0,2	1,2	–	0,1	0,7	0,2	0,9
3	61,54	7,8	0,6	1,4	–	0,2	0,7	0,4	0,9
4	5,78	63,05	3,36	19,87	7,94	–	–	–	–

Изучение поведения гетерогенного магнетита в условиях, приближенных к условиям аглопроцесса, позволяет определить активность данной фазы в расплавообразовании. С этой целью исследовали поведение природных кристаллов магнетита Ковдорского месторождения при нагреве 1100 и 1300°С в восстановительной атмосфере с соотношением CO_2/CO как 80:20.

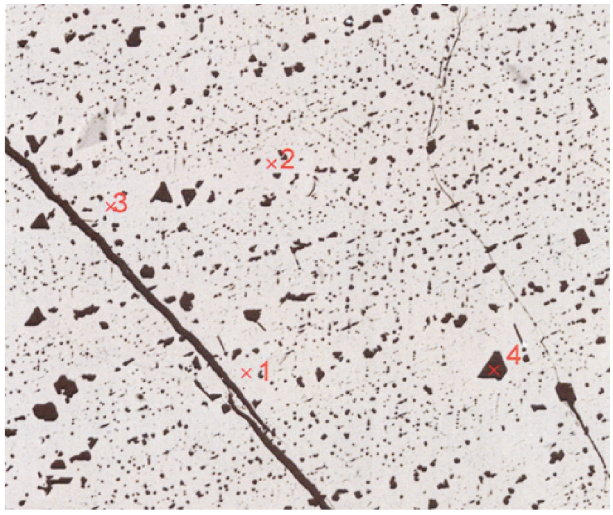


Рис. 1. Исходный кристалл магнетита гетерогенного строения, х600

Исходная структура кристаллов магнетита (рис. 1) представляет собой шпинельную фазу магномагнетита в ассоциации с кристаллами алюмосиликатов магния (табл. 1). В процессе термообработки при 1100°С в слабо восстановительной атмосфере (CO_2/CO = 80/20) между этими фазами происходит взаимодействие и матрица магномагнетита распадается на две условные шпинельные фазы, одна из которых ассимилирует титан и алюминий, а содержание магния при этом в ней снижается, вторая состоит в основном из магномагнетита (рис. 2, табл. 2).

При увеличении температуры термообработки до 1300°С характер гетерогенности структуры магнетита не изменяется (рис. 3). При этом методом мессбауэровской спектроскопии установлено появление вюститной фазы и незначительного количества расплава кальций железистого оливина типа $CaFeSiO_4$.

Таким образом, при восстановлении и распаде кристаллов природного магнетита магнезиовюстит появляется на месте ранее существовавшей матрицы, а участки магнетита сложного состава не восстанавливаются в условиях эксперимента и остаются на месте скопления микрофаз в микроструктуре природных магнетитов, подчеркивая их гетерогенность.

Принимая во внимание, что время термообработки 15 минут значительно больше, чем время, когда данный материал может находиться при высокой температуре и восстановительной атмосфере в усло-

виях реального агломерационного процесса, можно с уверенностью заключить об инертном поведении гетерогенного магнетита в процессе спекания.

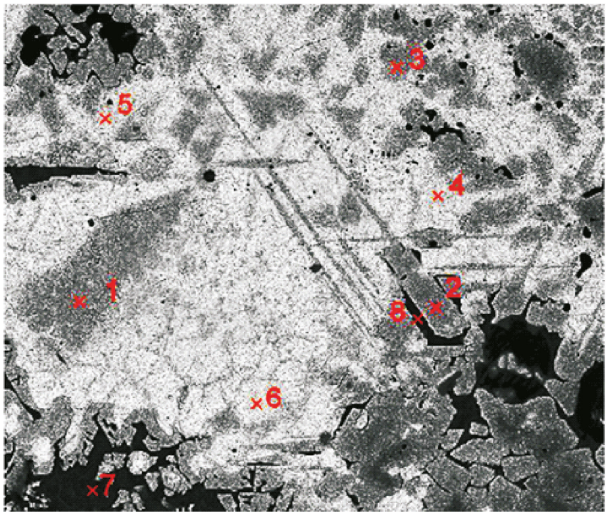


Рис. 2. Кристалл магнетита гетерогенного строения после термообработки при T=1100 °C, CO_2/CO = 80/20

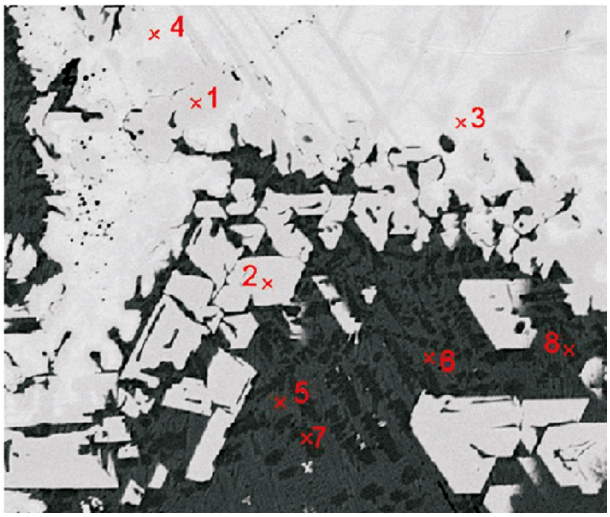


Рис. 3. Кристалл магнетита гетерогенного строения после термообработки при T=1300 °C, CO_2/CO = 80/20

Таблица 2

Точки	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3	SiO_2	CaO	TiO_2	V_2O_5	MnO
1 (темная фаза)	90,93	3,2	2,86	–	0,26	1,48	0,46	0,81
5 (светлая фаза)	92,06	6,66	–	–	0,29	–	–	0,98

Список литературы

1. Lamberg, P., 2011, Particles — the bridge between geology and metallurgy: Conference in mineral engineering, Luleå, Sweden, 8–9 February, Proceedings, p. 1–16.
2. Базилевич С.В., Вегман Е.Ф.Агломерация. М.: Металлургия, 1967. – 367 с.
3. Малышева Т.Я. Железорудное сырье: упрочнение при термообработке. М.: Наука, 1988. — 197 с.
4. Журавлев Ф.М., Малышева Т.Я. Окатыши из концентратов железистых кварцитов. М.: Металлургия, 1991. — 125 с.
5. Малышева Т.Я,. Долицкая О.А. Петрография и минералогия железорудного сырья.– М.: МИСиС, 2004. — 424 с.
6. Малышева Т.Я., Деткова Т.В., Логинов И.В., Горшколепова А.В. Фазовый состав и структурные особенности промышленного агломерата Череповецкого металлургического комбината «ОАО Северсталь» // Металлург. – 2010.– № 5. – С.38–42.
7. Малышева Т.Я, Павлов Р.М. Влияние минералогического состава связок на прочностные свойства агломератов различной основности. Известия вузов. Черная металлургия. 2012, № 11, с. 6–10.
8. Деткова Т.В., Малышева Т.Я., Павлов Р.М. Исследование агломератов череповецкого металлургического комбината ОАО «Северсталь» в интервале основности 1,0–3,0. Известия вузов. Черная металлургия. 2013, № 7, с. 3–8.
9. Чернышёва Л.В., Смелянская Г.А., Зайцева Г.М. Типоморфизм магнетита и его использование при поисках и оценке рудных месторождений. — М.: Недра, 1981. — 235 с.

В.А. Кобелев, М.В. Мамаев, Д.Ю. Дунцев,
ООО «Проминтех НКА»
И.П. Беликов, ООО «Башминералресурс», Г.А. Нечкин,
ОАО «Уральский институт металлов»

ПРИМЕНЕНИЕ МАРГАНЦОВОГО ИЗВЕСТНЯКА В КАЧЕСТВЕ ФЛЮСУЮЩЕЙ ДОБАВКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОКАТЫШЕЙ

В последнее время на рынке флюсов появилось новое сырье — марганцовистый известняк, который эффективно используется на НЛМК при производстве железорудного агломерата. Оксид марганца, содержащийся в известняке, снижает температуру плавления агломерата, карбонат кальция служит флюсом, а физические свойства известняка способствуют повышению комкуемости шихты и прочности агломерата. Проведенные в Уральском институте металлов и на НЛМК исследования показали, что использование в доменных печах неофлюсованных окатышей приводит к загромождению коксовой насадки горна, снижению производительности и повышению расхода кокса. Офлюсование окатышей позволит устранить прогрессивное загромождение горна доменных печей, интенсифицировать процесс производства чугуна и повысить его экономическую эффективность.

Лабораторные исследования по офлюсованию окатышей марганцовистым известняком производили на базе концентрата Стойленского ГОКа.

Были произведены окатыши следующих видов:

1) Неофлюсованные окатыши на бентонитовой связке;
2) Офлюсованные обычным известняком (4%) на бентонитовой связке;
3) Офлюсованные марганцовистым известняком (без бентонита) с концентрацией марганцовистого известняка 1, 2, 3, 4 и 5%.

Для определения прочности сырых окатышей они сбрасывались с высоты 30 см на твердую поверхность. Прочность измерялась в количестве падений до деформации. Результаты определения прочности сырых окатышей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты определения прочности сырых окатышей

Окатыши	Содержание добавки в шихте,%	Прочность, кол–во сбрасываний
Неофлюсованные на бентонитовой связке	0,8	2,75
Офлюсованные обычным известняком на бентонитовой связке	Бентонит 0,8; Известняк 4	3,9
Офлюсованные марганцовистым известняком без бентонита	1	3,05
	2	3,6
	3	4,45
	4	5,4
	5	3,5

Анализ полученных результатов показывает, что прочность сырых окатышей, офлюсованных марганцовистым известняком выше, чем у неофлюсованных окатышей на бентоните. Влага, удерживаемая марганцовистым известняком, повышает пластичность окатышей и сопротивление динамическим нагрузкам. При офлюсовании окатышей обычным известняком с вводом в шихту бентонита прочность сырых окатышей выше, чем неофлюсованных.

Вторым важным показателем качества сырых окатышей является их термостойкость (температура «шока»), то есть поведение при резком нагреве в условиях термообработки на обжиговой машине. Определение термостойкости окатышей производили по методике МИСИС. Влажные окатыши загружали в печь, предварительно разогретую до заданной температуры. Температуру, при которой окатыши трескаются и разрушаются, принимают за температуру «шока», при этом число разрушившихся окатышей должно составлять не менее 50%.

В результате исследований установлено, что неофлюсованные окатыши на бентонитовой связке разрушаются при температуре 870 °С, окатыши с 4% марганцовистого известняка и 4% обычного известняка при 1000 °С. Высокая температура шока обеспечивает сохранение окатышей при интенсивном нагреве на обжиговой машине.

После окомкования сырые окатыши обжигали в муфельной печи в воздушной атмосфере по режиму, приближенному к режиму термообработки на обжиговой машине.

После термообработки и охлаждения, обожженные окатыши испытывали на прочность на сжатие по ГОСТ 24765–81.

Результаты определения прочности обожженных окатышей по ГОСТ 24765–81 приведены в табл. 2.

Таблица 2. Прочность обожженных окатышей СГОК по ГОСТ 24765–81, кг/окат.

Окатыши	Содержание, %	Максимальная температура обжига, °С		
		1240	1300	1330
Неофлюсованные с бентонитом	Бентонита 0,8		262	282
Офлюсованные обычным известняком с бентонитом	Бентонита 0,8; известняка 4	284	358	
Офлюсованные марганцовистым известняком без бентонита	1		313	203
	2		331	304
	3		402	418
	4	295	402	516
	5		366	411

Анализ приведенных в табл. 2 данных показывает, что прочность окатышей с марганцовистым известняком выше, чем с обычным известняком как при 1300 °С, так и при 1240 °С.

Марганцовистый известняк, используемый в качестве связующего и флюса при производстве окатышей, в процессе декарбонизации повышает пористость, что способствует повышению окисления магнетита на стадии нагрева и благоприятно сказывается на прочностных характеристиках обожженных окатышей.

Формирование развитой поровой структуры при обжиге окатышей обеспечивает лучшие условия для их окисления, а также создает предпосылки ускорения процесса восстановления при металлизации.

Полученные результаты показывают, что ввод в шихту марганцевого известняка повышает прочность окатышей СГОК.

Зависимость прочности обожженных офлюсованных окатышей от температуры носит экстремальный характер с максимумом прочности при 1330°С. Зависимость прочности окатышей при этой температуре от содержания марганцовистого известняка и извести также носит экстремальный характер. При содержании марганцовистого известняка 4% окатыши обладают максимальной прочностью.

Таким образом, ввод в шихту окатышей марганцовистого известняка позволяет повысить прочность окатышей при температурах обжига 1240–1300 °С по сравнению с неофлюсованными окатышами, произведенными на бентоните и офлюсованными обычным известняком.

Повышение прочности окатышей при офлюсовании марганцовистым известняком и известью в условиях производства дает возможность снижения максимальной температуры обжига или повышения производительности с учетом получения заданной прочности 250 кг/окатыш.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВОЙСТВ ОКАТЫШЕЙ СГОК

Температурный интервал пластично-вязкого состояния

Определение параметров пластично-вязкого состояния железорудных материалов произведено по ГОСТ 26517–85 «Руды железные, агломераты и окатыши. Было проведено исследование параметров пластично-вязкого состояния лабораторных окатышей СГОК, промышленных окатышей МГОК и ЛГОК. Результаты испытаний приведены в табл. 3, в которой представлены определенные ранее аналогичные показатели для агломерата НЛМК.

Неофлюсованные окатыши СГОК имеют более низкую температуру размягчения, чем окатыши МГОК и ЛГОК. Температура плавления окатышей СГОК ниже, чем МГОК и ЛГОК, но интервал пластично-вязкого состояния окатышей СГОК в два раза больше, чем у окатышей МГОК и ЛГОК.

Таблица 3. Параметры пластично–вязкого состояния железорудных материалов

Железорудный материал	Температура размягчения $T_р$, °С	Температура плавления $T_{пл}$, °С	Температурный интервал пластично-вязкого состояния (ТИПВС) $T_{пл}–T_р$, °С
Агл. НЛМК осн. 1,7 с Mn	1260	1450	190
Окатыши ЛГОК	1335	1430	95
Окатыши МГОК	1325	1410	85
Окатыши СГОК неофл.	1205	1420	215
Окатыши СГОК с изв–ком	1255	1460	205
Окатыши СГОК с Mn-изв-ком (3%)	1275	1450	175
Окатыши СГОК с Mn-изв-ком (5%)	1230	1455	225

Офлюсование окатышей СГОК марганцовистым известняком (3%) повышает их температуру размягчения и приближает к температуре размягчения агломерата, а температуру плавления — к температу-

ре плавления агломерата основностью 1,7 с повышенным содержанием оксида марганца. При вводе в шихту окатышей марганцовистого известняка в количестве 5% температура плавления практически не изменяется, а температура размягчения снижается и увеличивается интервал пластично–вязкого состояния.

На рис. 1 приведены данные о расположении зоны пластично–вязкого состояния железорудного сырья НЛМК.

Полученные данные показывают, что наиболее высокая эффективность доменной плавки в зоне когезии может быть достигнута при использовании с агломератом НЛМК окатышей СГОК, офлюсованными марганцовистым известняком в количестве 3%.

Окончательный вывод о применении офлюсованных окатышей СГОК и способе их офлюсования можно сделать после получения данных о фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку.

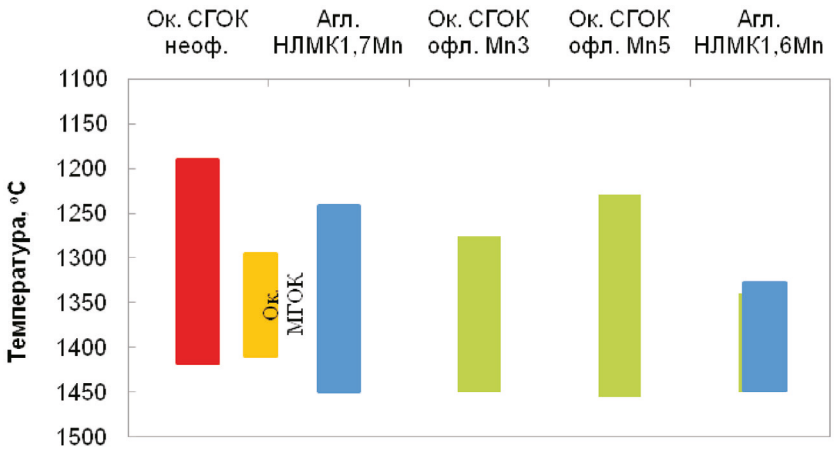


Рис. 1. Расположение зоны пластично-вязкого состояния агломератов НЛМК и окатышей СГОК

Фильтруемость продуктов плавки через коксовую насадку

Моделирование процесса фильтрации продуктов плавки окатышей и агломерата через коксовую насадку производили по специально разработанной методике [Чернавин А.Ю., Нечкин Г.А., Чернавин Д.А., и др. Моделирование поведения шихтовых материалов в нижней части доменной печи. Сталь, 2010. № 5, С. 20–23].

Исследования фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку проведены для лабораторных агломератов НЛМК, окатышей СГОК и промышленных окатышей МГОК И ЛГОК. Результаты исследований приведены в табл. 4.

Таблица 4. Показатели фильтруемости продуктов плавки железорудных материалов через коксовую насадку

Железорудный материал	Показатели		
	Фильтруемость продуктов плавки всего, %	Фильтруемость шлака, %	Время фильтрации, мин
Окатыши ЛГОК	73,9	0	30
Окатыши МГОК	81,3	0	47
Окатыши СГОК неофл.	82,2	10,3	30
Окатыши СГОК с изв–ком	84,7	32,1	16
Окатыши СГОК с Mn-изв-ком (3%)	83,6	35,1	18
Окатыши СГОК с Mn-изв-ком (5%)	85,6	43,7	14

Через коксовую насадку практически не фильтруется шлаковая часть неофлюсованных окатышей МГОК и ЛГОК. Основной причиной является высокая температура плавления пустой породы в окатышах. У офлюсованных известняком окатышей СГОК продукты плавки фильтруются через коксовую насадку лучше, чем у неофлюсованных, при этом фильтруемость шлака возрастает с 10 до 32%.

Использование для офлюсования окатышей СГОК марганцовистого известняка повышает фильтруемость продуктов плавки в целом и шлака в частности. Особенно эффективно действует добавка в шихту окатышей 5% марганцовистого известняка.

На рис. 2 приведены фото коксов после фильтрации окатышей СГОК.

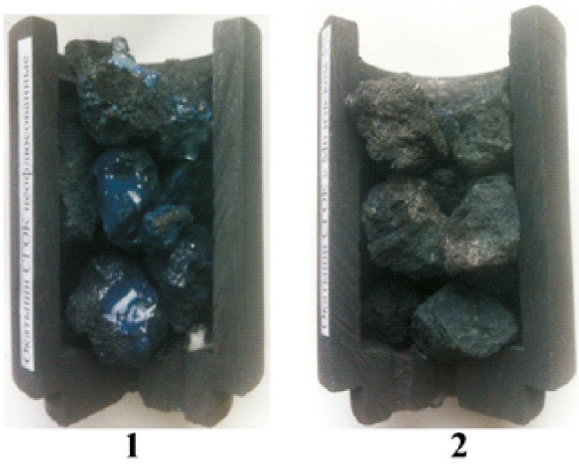


Рис. 2. Коксы после фильтрации окатышей СГОК
1 — неофлюсованные окатыши; 2 — окатыши с 5% Mn известняка

На поверхности кусков кокса после фильтрации неофлюсованных окатышей наблюдается наличие большого количества шлака Почти чистый кокс остается при плавке окатышей, офлюсованных марганцовистым известняком в количестве 5%.

Таким образом, доменная плавка неофлюсованных окатышей СГОК осложняется особым поведением шлаковой части, плохо фильтрующейся через коксовую насадку. Офлюсование окатышей СГОК марганцовистым известняком в количестве 5% значительно повышает фильтруемость продуктов плавки через коксовую насадку, особенно шлаковой части.

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение марганцовистого известняка при производстве окатышей позволяет повысить прочность и высокотемпературные свойства железорудного сырья.

Г.Г. Валявин, Л.А. Смирнов, А.Ю. Чернавин,
ОАО «Уральский институт металлов»
М.И. Стуков, М.В. Мамаев, ООО «Проминтех-НКА»

ПЕРСПЕКТИВЫ КОКСОДОМЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕФТЕУГЛЕРОДНЫХ ПРОДУКТОВ

Структура процессов на российских нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) в настоящее время позволяет получать в среднем из одной тонны нефти ~ 14% бензина, 26% дизельного топлива, и ~27% мазута (таблица 1), тогда как на НПЗ развитых стран мира получают до 43% бензина и не более 5% мазута [1].

Низкая глубина переработки нефти в РФ вызвана слабым развитием процессов ориентированных на углубленную переработку нефти с широким использованием термодеструктивных и гидрокаталитических процессов. Если на НПЗ РФ доля мощностей доизвлечения составляет 60–70% от первичной переработки, то на НПЗ США мощности углубляющих деструктивных процессов превышают мощности первичной переработки на 35–40%. [1,2].

Существенное сокращение производства топочных мазутов и, как следствие, увеличение глубины переработки нефти может быть достигнуто за счёт увеличения мощностей по конверсии тяжёлых нефтяных остатков, таких как битумы и мазуты.

Из всего многообразия технологий глубокой переработки нефти за рубежом значительное место принадлежит процессу замедленного коксования (таблица 2), как одного из наиболее экономически эффективных, недорогих, достаточно апробированных и динамично развивающихся технологий. В США процесс замедленного коксования по объёму переработки сырья является вторым после каталитического крекинга и обеспечивает 4–5% экономии сырой нефти. Именно широкое распространение процесса коксования и квалифицированная переработка получаемых в процессе дистиллятов в моторные топлива, позволяет экономить США ~ 250 млн. тонн в год сырой нефти [1].

Таблица 1. Объем добычи нефти и производства основных нефтепродуктов РФ (данные АНН)

Показатели	Год				
	2007	2010	2011	2013	2015
Добыча нефти, млн. т	466,8	–	–	522,8	534,1
Переработка нефти, млн. т	238,3	248,8	256,445	278,1	282,7
Произведено, млн. т (% от первичной переработки):					
– автомобильный бензин,	35,1 (14,7)	35,9 (14,4)	36,647 (14,3)	38,78 (13,9)	39,2 (13,8)
в т.ч. экспорт;	5,3 (2,2)	3,3 (1,3)	н/д	4,0 (1,4)	4,7 (1,7)
– керосин авиационный,	–	9,1 (3,7)	9,257 (3,6)	–	9,6 (3,4)
в т.ч. экспорт;	–	1,2 (0,5)	н/д	–	–
– дизельное топливо,	65,6 (27,5)	70,1 (28,2)	70,581 (27,5)	71,6 (25,7)	76,1 (26,9)
в т.ч. экспорт	35,7 (15,0)	38,2 (15,4)	н/д	43,0 (15,5)	44,4 (15,7)
– мазут, топочный	72,6 (30,5)	67,1 (27,0)	70,521 (27,5)	76,74 (27,6)	71,0 (25,1)
в т.ч. экспорт	55,5 (23,3)	53,2 (21,4)	н/д	58,5 (21,0)	53,2 (18,8)
битум					4,97 (1,7)

Таблица 2. Мощности промышленных установок переработки остатков в мире (тыс. барр/сутки) [3]

Технология переработки остатков	Регион						% мощности
	США	Европа	Канада, Мексика, Венесуэла	Япония	Остальной мир	Всего в мире	
Технологии с удалением углерода							
Термический крекинг/висбрекинг	44	2260	331	24	1635	4293	25,85
Коксование	2245	673	951	66	1169	5104	30,73
Общее	2289	2983	1282	90	2804	9397	56,58
Технологии с добавлением водорода							
Гидроочистка	499	149	30	591	1042	2312	13,92
Гидрокрекинг эбуляционный	102	79	244	23	49	497	2,99
Гидрокрекинг слари	-	-	4	-	-	4	0,02
Каталитический крекинг остатков	831	681	281	318	1832	3942	23,73
Общее	1432	909	559	932	2923	6755	40,66
Деасфальтизация	283	46	39	16	75	458	2,76
Общее	4002	3889	1879	1037	5801	16609	100,00

Основным назначением процесса замедленного коксования за рубежом является максимальная выработка дистиллятов, а получаемый нефтяной кокс рассматривается как продукт для выработки спецкоксов для алюминиевой и электродной промышленности. За счёт строительства новых и реконструкции старых УЗК мировой рынок нефтяного кокса постоянно растёт: в 1996 г. было произведено 35 млн. т кокса, в 2000 г. – 48 млн. т., в 2004 г. – 60 млн. т., в 2008 г. – 80 млн. т., в настоящее время его производство превысило 100 млн. т/год [3].

Таблица 3. Перечень УЗК на отечественных НПЗ и выработка нефтяного кокса (данные АНН)

Предприятие	Проектная мощность по сырью, тыс. т/год	Ввод в эксплуатацию	Количество установок	Объём производства кокса, тыс .т/год					Содержание серы в коксе, % масс.
				2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	
ООО «Лукойл-Волгограднефтепереработка»	1000 300	2012 1982	2	151,7	251,8	270,4	303,2	312,7	1,5-1,8
ООО «Лукойл-Пермнефтеоргсинтез»	600	1970	1	204,0	256,8	251,5	277,5	282,2	2,5-3,0
ОАО «Новокуйбышевский нефтеперерабатывающий завод»	1500	1985	1	184,7	178,8	180,0	201,7	214,1	3,5-4,0
ОАО «Ангарская нефтехимическая компания»	600	1970	1	163,3	152,3	146,0	145,7	154,3	1,4-1,6
ООО «РН-Комсомольский НПЗ»	1000	2012	1	–	27,1	28,7	62,9	13,2	1,1-1,3
ОАО «Газпром нефть-Омский НПЗ»	600	1971	1	185,7	168,3	159,0	155,5	162,4	1,3-1,5
ОАО «НОВОЙЛ»	300	1956	1	247,4	237,6	240,8	266,6	270,7	3,8-4,4
ОАО «Уфанефтехим»	1200	2009	1	479,7	398,2	~560	560,0	545,3	3,8-4,1
Всего	7100	–	9	1616,5	1675,9	~1810	1973,1	1954,9	–

В бывшем СССР эксплуатировались 22 установки замедленного коксования, основным назначением которых было получение малосернистого крупнокускового нефтяного кокса для алюминиевой промышленности в соответствии с требованиями ГОСТ 22898-78.

На начало 2016 г. на НПЗ РФ в эксплуатации оставалось 9 УЗК и было выработано ~2,0 млн. т нефтяного кокса (таблица 3). В 2016 г. введены в эксплуатацию новые УЗК в г.г. Перми, Нижнекамске и Антипинске (Тюменская обл.), завершается строительство УЗК на Ачинском НПЗ, предполагается строительство УЗК на Омском, Московском, Уфимском, Марийском, Ильском и Яйском НПЗ. В результате мощность УЗК по сырью увеличится на ~9,5 млн.т/в год, а общая выработка нефтяного кокса на всех УЗК превысит ~6 млн. т/в год. В настоящее время только на трёх НПЗ, перерабатывающих малосернистые нефти, вырабатывается нефтяной кокс в полном соответствии с корпоративными требованиями предприятий компании «РУСАЛ» по содержанию серы и металлов. После пуска в эксплуатацию УЗК на Ачинском НПЗ, новой УЗК на Омском НПЗ и доведения до проектной производительности УЗК на НПЗ Комсомольск-на-Амуре, потребности алюминиевой промышленности в малосернистом нефтяном коксе (~2,0 млн.т/г) будут полностью удовлетворены, в связи с чем все другие производители столкнутся с проблемами реализации и квалифицированного использования кокса с содержанием серы от 3,0% и выше. Строительство новых УЗК сдерживается отсутствием альтернативных потребителей сернистого нефтяного кокса, поскольку использование кокса в РФ в качестве энергетического топлива и в цементной промышленности достаточно проблематично по причине низкой стоимости природного газа.

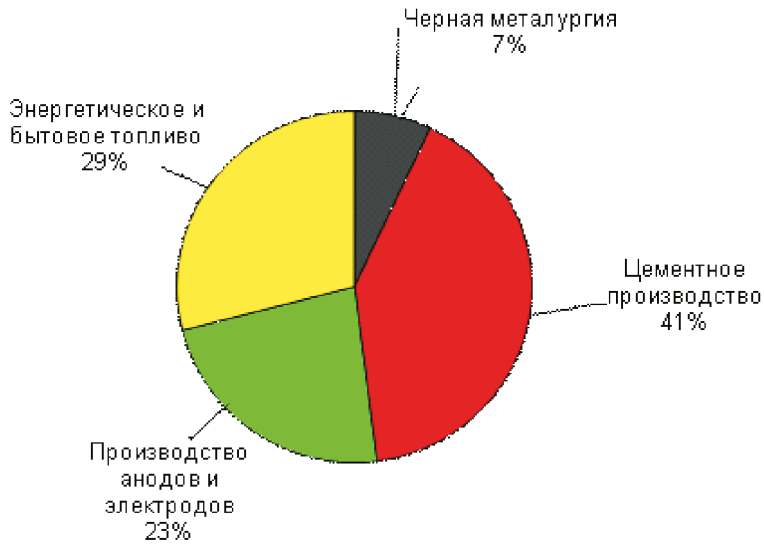


Рис. 1. Структура потребления нефтяного кокса в РФ

При рассматривании вопросов о расширении традиционных и альтернативных направлений использования нефтяного кокса [21], основные трудности возникают из-за несоответствия его физико-химических характеристик требованиям конкретных потребителей, в частности, по содержанию летучих веществ, серы, золы, гранулометрическому составу, механической прочности и т.д. [4÷6].

Одним из альтернативных направлений использования нефтяного кокса может считаться коксохимическая промышленность.

Теория и практика [7, 8, 9] свидетельствуют, что качество доменного кокса определяется главным образом технологическим составом и качеством угольной шихты и в меньшей степени – условиями коксования. В этой связи основное внимание при решении проблемы улучшения качества металлургического кокса на коксохимических предприятиях уделяется вопросам оптимизации состава угольной шихты. Из наиболее простых и достаточно эффективных способов улучшения эксплуатационных свойств металлургического кокса при коксовании угольных шихт неоптимального состава является введение

в них различных углеродных добавок, в том числе нефтяного происхождения: нефтекоксовой мелочи [10÷14], нефтяных спекающих добавок [15÷17], тяжелых нефтяных остатков различного происхождения [18]. Однако, несмотря на многочисленные и многолетние исследования и опытно-промышленные испытания технологий использования в угольных шихтах углеродных добавок нефтяного происхождения взамен тощих или жирных углей, промышленной реализации они не получили по ряду экономических и технологических причин.

Объективной реальностью коксохимического производства России является дефицит особо ценных коксующихся углей, отсутствие или недостаточное количество которых в угольных шихтах обусловливает получение металлургического кокса с недостаточным уровнем эксплуатационных свойств, что, как следствие, обусловливает повышенные материальные и финансовые затраты в доменном производстве.

Многолетние исследования специалистов ВУХИН и УГНТУ показали, что введение в угольные шихты нефтяного кокса с содержанием летучих веществ 15-25% для замены коксующихся углей марок К, КО и ОС позволяет увеличить механическую прочность и существенно улучшить эксплуатационные свойства металлургического кокса [19÷20].

В 2008 г. ими совместно с фирмой «Проминтех» была разработана технология получения и организовано промышленное производство на установках замедленного коксования добавки коксующей – нефтяного кокса с повышенным (15–25%) по сравнению с традиционным нефтяным коксом (9–12%) содержанием летучих веществ, а также технология ее использования в шихте коксования углей [21÷23].

Крупномасштабные промышленные испытания добавки коксующей в угольных шихтах [24], а также ее индивидуальное коксование показали, что по своей технологической ценности добавка значительно превосходит все отечественные и зарубежные угли (таблица 4), что послужило основанием назвать ее не добавкой, а нефтяным коксующимся углем – Petro Coking Coal (PCC).

Таблица 4. Технологические характеристики PCC в сравнении с лучшими коксующимися углями и потребительские свойства доменных коксов из них

Показатели качества	Norwich Park	Saraji	Riverside	Peak Downs	PCC 1	PCC 2
Влага аналитическая (W^a),%	0,74	0,88	1,17	0,81	0,28	0,1
Зольность (A^d),%	12,08	11,48	12,05	12,08	0,90	0,23
Выход летучих веществ (V^{daf}),%	19,37	20,39	23,24	21,98	17,3	21,0
Показатель отражения витринита ($R_{o,n}$),%	1,50	1,40	1,18	1,29	2,39	2,81
Показатели спекаемости и коксуемости						
Толщина пластического слоя (y), мм	13	15	15	17	18	22
Пластометрическая усадка (x), мм	15	17	29	14	36	40
Индекс свободного вспучивания (SI), ед.	8	$7^1/_2$	$2^1/_2$	$7^1/_2$	$2^1/_2$	$3^1/_2$
Вспучивание по ИГИ-ВУХИН	36	27	13	28	9	54
Индекс Рога (RI), ед.	47	35	22	44	22	81
Тип кокса по Грей-Кингу	G_3	G_3	G	G_3	G_3	G_{11-12}
Дилатация по Одибера-Арну (в),%:						
t_1	415	410	390	395	270	235
t_2	470	475	450	450	435	320
t_3	490	490	-	480	470	480
a	31	28	22	39	36	31
b	-5	-5	-	-20	-25	215
Реакционная способность CRI, (%)	21	17	21	17	23	21
Послереакционная прочность CSR, (%)	67	74	72	74	73	69

Достоверно установленным параметром, гарантирующим коксующие и спекающие свойства РСС, является массовая доля летучих веществ (V^{daf}) в пределах 15÷22% абс. Указанная величина может быть использована в нормативно-технической документации при реализации коммерческо-производственной и технико-технологической составляющих проекта РСС.

Разработчиком и держателем патентов технологического аспекта по производству РСС является коллектив Российских учёных из области нефтепереработки [23].

Результаты лабораторных исследований и промышленных испытаний в доменной плавке коксов, произведённых с привлечением РСС, демонстрируют снижение материальных и финансовых затрат при производстве кокса и чугуна [24÷28]. Основой экономии служат уникальные технологические и потребительские свойства кокса из РСС (таблица 4), в том числе:

- низкая зольность;
- низкая смачиваемость доменным расплавом;
- оптимальные величины горючести, реакционной способности и послереакционной прочности;
- малая склонность к шлакопоглощению и продуцирование карбидов кремния в поглощённом силикатном расплаве;
- отсутствие минеральных форм серы.

Указанный комплекс свойств кокса из РСС существенно улучшает процессы тепломассообмена в горне доменной печи, в том числе оптимизацию потока горновых газов, что в свою очередь обеспечивает:

- уменьшение износа футеровки и элементов системы охлаждения печи, что равнозначно уменьшению эксплуатационных и инвестиционных затрат на 100÷300 рублей с каждой тонны выплавленного чугуна;
- уменьшение величины тепловых потерь с охлаждающей водой, что эквивалентно уменьшению удельного расхода кокса на 8÷24 кг/т чугуна;
- улучшение степени использования топливных добавок (природный газ, пылеугольное топливо), что эквивалентно уменьшению удельного расхода кокса на 10÷15 кг/т чугуна;
- улучшение прогнозируемости и управляемости процессом выплавки чугуна, его выпуска из горна, транспортировки и переработки в сталь, что обеспечивает уменьшение удельных расходов железа шихты и углерода топлива на 8÷12 кг/т чуг. и 3÷5 кг/т чуг. соответственно.

Суммарная эффективность выплавки каждой тонны чугуна с использованием кокса из РСС оценивается в зависимости от технического состояния доменной печи от 475 рублей до 1237 рублей (таблица 5). Эффективность в коксохимическом и сталеплавильном производствах не менее внушительна и однозначно положительна.

Таблица 5. Расчётные величины статей снижения затрат кокса, железа и финансовых средств на выплавку одной тонны чугуна

№ п/п	Статьи затрат, их величины и механизм воздействия для их снижения	Величина снижения затрат	
		Абсолютная, кг/т чуг.	Стоимостная, руб./т чуг.
1.	Углерод кокса на карбидообразование (SiC) при типовом режиме (20% SiC) и замене на кокс РСС (5% SiC), т.е. при снижении SiC в коксе на 15% абс.	5,3	53
2.	Снижение тепловых потерь через систему охлаждения низа шахты, распара и заплечиков на 25 МВт	22,8	228
3.	Улучшение коэффициента замены кокса природным газом с 0,80 до 0,90 при его удельном расходе 112 м^3/т чуг.	11,2	112
4.	Улучшение степени использования восстановительной энергии печных газов η_{CO+H2} с 45% до 49% отн., т.е. на 4%	12,0	120
5.	Уменьшение потерь углерода/железа в виде минерального «слоя» в чугуновозах миксерного типа и в миксерах ККЦ	3,7/15	37/83
6.	Уменьшение износа огнеупорной футеровки и водоохлаждаемых элементов конструкции печи	– / —	– / 497
	ИТОГО в стоимостном исчислении		1130 руб./т чуг.

Емкость коксодоменного рынка по РСС в Российской Федерации на 2020 год оценивается в 6 млн. тонн, при этом в отличии от углеграфитовой отрасли, требования коксодоменного рынка совершенно лояльны к составу минеральной части РСС и к структуре углерода [29, 30]. Исходя из потенциальных возможностей нефтеперерабатывающей отрасли РФ в части производства твёрдых углеродных продуктов в виде нефтяных коксов и РСС на уровне 4 млн. тонн в год (таблица 3) следует признать своевременность и полезность формирования коксодоменного рынка РСС.

ВЫВОДЫ:

1. Разработана и промышленно используется технология глубокой переработки нефти с получением твёрдого углеродного продукта – синтетического коксующегося угля РСС.
2. Синтетический коксующийся уголь РСС обеспечивает получение металлургического кокса с высокими потребительскими свойствами.
3. Использование в доменной плавке металлургического кокса, произведённого из РСС, позволяет улучшить тепло-массообменные процессы выплавки чугуна и, тем самым, уменьшить материальные и финансовые затраты до 1130 рублей с каждой тонны выплавленного чугуна.
4. Потребность коксодоменной отрасли РФ в синтетическом коксующемся угле РСС в период 2016 года составляет 2,0 млн. т и возрастает к 2020 году до 6,0 млн. т.
5. Потенциальная возможность нефтеперерабатывающей отрасли РФ по производству твёрдых углеродных продуктов на 2016 год оценивается в 2,0 млн. т, дополнительно планируется к производству ~4 млн. т.
6. Потребность в РСС коксодоменной отрасли РФ является надёжным маркером для развития проектов углублённой нефтепереработки по схеме получения твёрдых углеродных продуктов, преимущественно в виде синтетического коксующегося угля РСС.

Список использованных источников информации

1. Современное состояние и важнейшие достижения мировой нефтепереработки в развитии технологии коксования остаточных нефтепродуктов для углубления переработки нефти и увеличения производства моторных топлив и нефтяных коксов: Аналитический обзор . — М.: ОАО «ЦНИИТЭнефтехим», 2005 г. — 48 с.
2. Руднев И. Нефтепереработка в ногу со временем. Мало выпускать качественный бензин — нужно сократить выпуск мазута // Газета «Известия». — 2010. 09 апреля.
3. Predel H. und Nielsen M Petroleumkoks — Enwicklung und Tenderzen // Erdöl und Kohle, 2005, — Bd. 121. — № 10, s. 348, 350–352.
4. О.Ф. Глаголева Кокс нефтяной // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. — 2009, №№ 3, 4, 5, 6.
5. З.И. Сюняев Производство, облагораживание и применение нефтяного кокса. М.: Химия, 1973. — 295 с.
6. В.М. Уфимцев, Ф.Л. Капустин, В.А. Пьячев Нефтяной кокс в производстве вяжущих материалов. // Сухие строительные смеси. – 2009, №№ 5,6 (13–14), с. 24–26.
7. И.Д. Дроздник, А.Г. Дюканов, Н.И. Тарасенко «особенности подготовки угольной шихты для коксования в условиях изменяющейся сырьевой базы». — Кокс и химия, 2003, № 11, с. 5–7.
8. В.Л. Глинченко, В.М. Страхов «Специальные виды кокса и заменители кокса для недоменных производств». Кокс и химия, 2003, № 5, с.18–23.
9. Н.А. Беркутов, Ю.В. Степанов, Р.Р. Гилязетдинов и др. «Опыт оптимизации состава угольной шихты для коксования». — Кокс и химия, 2010, № 7, с. 13–16.
10. В.Я. Кошкаров, Р.Н. Гимаев, П.Г. Данильян и др. Перспективы потребления сернистого и высокосернистого нефтяного кокса // Химия и технология топлив и масел, 1980, № 4, с. 35–37.

11. М.Е. Кошкарова, П.Г. Данильян, В.Я. Кошкаров и др. Высокосернистый нефтяной кокс как отощающий компонент угольной шихты // Кокс и химия, 1981, № 9, с. 24–26.
12. О.Г. Унтербергер, В.Я. Кошкаров, В.М., В.М. Страхов и др. «Получение литейного кокса из шихты с участием нефтекоксовой мелочи». — Кокс и химия, 1995, № 12, с. 13–17.
13. В.Н. Егоров, Н.А. Тарасов, И.И. Мельников и др. «О кондиционировании угольной шихты для коксования». — Кокс и химия, 2006, № 12, с. 11–17.
14. Э.И. Горяник, А.Г. Дюканов, Ю.И. Гречко и др. «Получение различных видов кокса из различных видов кокса из угольных шихт с участием коксовой мелочи». — Кокс и химия, 1995, № 4, с. 11–13.
15. А.Б. Григоров, О.И. Зеленский «Спекающие органические добавки в шихту коксования (Обзор)». — Кокс и химия, 2013, № 7, с. 27–32.
16. Д.Ф. Донской и М.Г. Скляр «Оценка нефтяных спекающих добавок как компонента угольной шихты для коксования». — Кокс и химия, 1993, № 2, с. 7–9.
17. В.М. Шмалько, В.Г. Трофимова, Д.Ф. Донской и др. «Влияние нефтяных спекающих добавок на формирование структуры кокса». — Кокс и химия, 1990, № 8, с. 12–15.
18. М.Г. Скляр, И.Т. Селянко, П.В. Карножицкий и др. «Использование жидких нефтяных продуктов в качестве добавок, улучшающих прочностные характеристики кокса». — Кокс и химия, 1990, № 5, с. 18–21.
19. М.И. Стуков, В.С. Загайнов, Я.Б. Куколев «Исследование возможности использования модифицированного нефтяного кокса в качестве коксующей добавки к угольной шихте с целью повышения прочностных показателей металлургического кокса // Кокс и химия, 2009, № 8, с. 12–15.
20. Разработка и освоение промышленного производства нефтяного кокса с повышенным содержанием летучих веществ / Валявин Г.Г. и др. // Нефтепереработка и нефтехимия, 2011, № 10, с. 13–14.
21. Перспективы развития процесса замедленного коксования в РФ и нетрадиционное направление использования нефтяного кокса / Валявин Г.Г. и др. // Мир нефтепродуктов, 2011, № 6, с. 22–24.
22. Патент РФ № 2400518 «Способ получения коксующей добавки замедленным коксованием», кл. C10B 55/00, опубл. 27.09.2010.
23. Патент РФ № 2355729 «Добавка коксующая», кл. C10B 57/04, опубл. 20.05.2009.
24. С.А. Косогоров, В.С. Загайнов, И.С. Цветков и др. «исследование процесса коксования шихты из 100% добавки коксующей». II Международный форум «Нефтекокс 2014» — Инфотек, 2014, № 5, с. 7–14.
25. Стуков М. И., Мамаев М. В., Чернавин А. Ю., Кобелев В. А. Новый кокс для металлургии. Неделя металлов Москве / Сб. трудов конференции – М., 2012.
26. А.Ю. Чернавин, Г.А. Нечкин, Д.А. Чернавин, С.А. Косогоров, М.В. Зорин, М.В. Мамаев. Новые возможности коксодоменного передела // Сталь. 2015. № 9. С. 5–13.
27. Влияние «Добавки коксующей» на работу горна доменных печей. Чернавин Д.А., Стуков М.И., Мамаев М.В., Косогоров С.А. V Международный Конгресс по агло-коксо-доменным производствам.
28. «Особенности формирования чугуна и шлака на коксе из «добавки коксующей». Чернавин Д.А., Стуков М.И., Мамаев М.В., Косогоров С.А. VI Международный Конгресс по агло-коксо-доменным производствам.
29. «Об оценке качества нефтяных коксов, используемых в алюминиевой промышленности». Ю.А. Уткин, Э.А. Янко, В.С. Носырев, Э.Я. Соловейчик, В.М. Страхов, И.В. Суровцева. // «Кокс и химия», №6, 2011 г., с. 23-26.
30. «Непрокалённые коксы в технологии искусственных графитов». В.С. Островский. // «Химия твёрдого топлива», № 6, 2011 г., с. 50–52.

Д.А. Чернавин, А.Ю. Чернавин,
ОАО «Уральский институт металлов»
М.И. Стуков, ООО «Проминтех-НКА»,
М.В Зорин, УрФУ им. Б.Н. Ельцина

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВА ДОМЕННОЙ ШИХТЫ С КОКСОВЫМИ НАСАДКАМИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ДОЛЕ В НИХ НЕФТЕУГЛЕРОДА

Лабораторные исследования взаимодействия доменного расплава со структурированными коксовыми насадками [1] выполнялись в граничных условиях однотипной железорудной части шихты (предварительно восстановленной до 90 ± 2% по отнятому кислороду), проплавляемой на промышленных и лабораторных коксах, произведённых из шихт с различной долей и различными видами нефтеуглеродных продуктов [2]. Все используемые для формирования структурированных насадок коксы предварительно подвергались частичной газификации в процессе определения показателей CSR и CRI по ГОСТ Р 54250-2010 [3]. Результаты лабораторных коксований шихт по ГОСТ 9521-74 и определение показателей качества полученных коксов представлены в табл. 1, из которой следует:

- типовые нефтяные коксы (НК) способствуют снижению реакционной способности (CRI) и ухудшают послереакционную прочность (CSR) и механическую прочность (CBS);
- новые нефтяной продукт ДК (добавка коксующая) повышают показатели CSR, механической прочности CBS при одновременном уменьшении CRI;
- степень влияния нефтяных углеродных добавок на показатели качества готового кокса зависят от долевого соотношения в каменноугольной части коксуемой шихты спекающих и отощающих компонентов.

Таблица 1. Программа коксований

ОФ, шахта, разрез	Марка	Показатели качества				Варианты шихт, %								Качество кокса		
		A^d, %	V^{daf}, %	S^d, %	y, мм	1 16126	3 16116	4	5	6 16120	7 16122	10 16145	11 16124	CRI	CSR	CBS
Эльгинская	Ж	13,3	39,8	0,20	20	15%	50%	25%	25%	25%	25%	20%	30%			
Распадская	ГЖ+ ГЖО	8,4	37,2	0,60	19	25%	–	–	–	–	–	–	–			
Кузбасская	Ж	11,4	35,0	0,27	18	–	–	25%	25%	25%	25%	–	–			
Томусинская	КО	8,5	24,0	0,26	11	15%	15%	20%	15%	10%	5%	–	–			
ДК		1,6	20,5	3,78	23	–	5%	–	5%	10%	15%	80%	70%			
Нерюнгринская	ОС	11,6	19,5	0,20	9	10%	15%	15%	15%	15%	15%	–	–			
Сибирь	ОС	9,0	18,3	0,40	5	35%	15%	15%	15%	15%	15%	–	–			
шихта 1	смесь	9,7	27,2	0,38	13	100%	–	–	–	–	–	–	–	29,4	52,4	–
шихта 3	смесь	11,1	30,2	0,42	15	–	100%	–	–	–	–	–	–	34,1	44,7	–
шихта 4	смесь	11,0	29,2	0,26	14	–	–	100%	–	–	–	–	–	40,1	35,0	84,0
шихта 5	смесь	10,6	29,0	0,44	14	–	–	–	100%	–	–	–	–	39,4	35,5	83,3
шихта 6	смесь	10,3	28,8	0,61	15	–	–	–	–	100%	–	–	–	39,3	36,1	85,4
шихта 7	смесь	9,9	28,6	0,79	15	–	–	–	–	–	100%	–	–	38,6	36,1	83,6
шихта 10	смесь	4,1	23,3	3,10	23	–	–	–	–	–	–	100%	–	28,8	51,2	83,4
шихта 11	смесь	5,4	24,7	2,73	22	–	–	–	–	–	–	–	100%	27,8	51,2	84,2

Таблица 2.1. Дренажная способность коксов

№ п/п	Показатели параметров плавления — фильтрации	Виды дренажной насадки из коксов типа:					
		Нефтекокс*	Кокс из шихты 1 газиф.	Кокс из шихты 4 исх.	Пековый	Нефтяной	Кокс из шихты 10 исх.
1.	Масса восстановленной железорудной части шихты, гр.: – железа общего – кислорода оксидов железа – шлакообразующих оксидов	462,0 333,0 24,0 105,0	462,0 333,0 24,0 105,0	462,0 333,0 24,0 105,0	466,0 333,0 28,4 105,0	466,4 333,0 28,4 105,0	466,4 333,0 28,4 105,0
2.	Теоретическая масса продуктов плавки, гр.: – чугун – шлак – всего продуктов	350,0 102,0 452,0	350,0 102,0 452,0	350,0 102,0 452,0	350,0 102,0 452,0	350,0 102,0 452,0	350,0 102,0 452,0
3.	Распределение продуктов плавки при фильтрации, гр.: – верхний тигель – средний тигель (на коксе) – нижний тигель – суммарно	5,0 15,75 (36,35) 394,9 452,0	15,0 31,0 (54,1) 351,9 452,0	10,0 17,05 (29,95) 395,0 452,0	20,0 25,8 (58,25) 347,95 452,0	10,0 17,45 (21,2) 403,35 452,0	10,0 20,61 (5,5) 415,90 452,0
4.	Объём кокса остаточного в среднем тигле, гр.	1/2	2/3	3/4	8/10	9/10	9/10
4.1.	Состояние массы кокса в среднем тигле, гр.	Монолит	Монолит	Монолит	Монолит	Ошлаков., россыпь	Сухой, россыпь
5.	Дренажная способность кокса общая, как отношение массы продуктов в нижнем тигле к суммарной массе, %	87,4	77,9	87,4	77,0	89,2	92,0
6.	Дренажная способность кокса для шлака, как отношение массы шлака в нижнем тигле к теоретическому его количеству, %	64,7	46,9	67,0	36,7	56,0	67,6
7.	Общее время плавления и фильтрации, мин.	22	34	32	30	26	20

* Нефтекокс без проведения испытаний по CSR и CRI, т.е. «сырой».

Главным показателем является «дренажная способность кокса для шлака» (п. 6). Величина показателя дренажной способности для шлакового расплава должна быть не менее 50% абс.; желательный уровень – не менее 65%; в идеале – не менее 75%.

Таблица 2.2 – Дренажная способность коксов с ДК и НК

№ п/п	Показатели параметров плавления — фильтрации	Виды коксовой насадки					
		ДК 100 (1000 °С)	ДК 100 (900 °С)	65 КСН, 20 НК, 15 ОПВ	ДК 70, Эльга 30* (шихта 11)	ДК 60, Эльга 30, НК 10*	ДК 40, НК 30, Эгльга 30*
1.	Масса восстановленной железорудной части шихты, гр.: – железа общего – кислорода оксидов железа – шлакообразующих оксидов	490,4 333,0 25,4 132,0	490,4 333,0 25,4 132,0	490,4 333,0 25,4 132,0	465,0 333,0 17,0 115,0	465,0 333,0 17,0 115,0	465,0 333,0 17,0 115,0
2.	Теоретическая масса продуктов плавки, гр.: – чугун – шлак – всего продуктов	350,0 127,0 477,0	350,0 127,0 477,0	350,0 127,0 477,0	350,0 110,0 460,0	350,0 110,0 460,0	350,0 110,0 460,0
3.	Распределение продуктов плавки при фильтрации, гр.: – верхний тигель – средний тигель (на коксе) – нижний тигель – суммарно	5,0 16,1 (5) 450,45 476,55	7,0 10,1 (3) 456,90 477,0	2,0 17,2 (18,8) 438,45 476,45	12,0 22,9 (6,45) 409,0 450,35	15,0 19,05 (9,25) 407,0 450,30	9,0 25,45 (17,55) 398,25 450,25
4.	Масса кокса остаточного в среднем тигле, гр.	89,70	84,80	92,40	68,75	82,55	75,35
4.1.	Убыль массы кокса (–) в среднем тигле, гр.	– 5,25	– 4,65	+ 10,15	– 5,55	– 7,95	– 12,10
5.	Дренажная способность кокса общая, как отношение массы продуктов в нижнем тигле к суммарной массе, %	94,5	95,8	92,0	90,8	90,4	88,5
6.	Дренажная способность кокса для шлака, как отношение массы шлака в нижнем тигле к теоретическому его количеству, %	87,0	88,1	77,2	80,0	74,6	71,1
7.	Общее время плавления и фильтрации, мин	25	23	32	23	25	33

* Очерёдность коксов по мере убывания доли ДК в них.

Схема лабораторной установки и порядок выполнения исследований по определению показателя «полнота истечения расплава из коксовой насадки» соответствовали ранее опубликованным требованиям [4].

Результаты проплавки однотипной предварительно восстановленной железорудной шихты на коксовых насадках из таблицы 1 представлены в таблицах 2.1, 2.2 и на фотографиях 1÷4. Обобщающими показателями эффективности работы коксовых насадок по дренажу расплава железорудной части доменной шихты являются «полнота истечения суммарная» и «полнота истечения шлака». При этом, полнота истечения шлака является функцией не столько поверхностных свойств кокса, сколько комплексным, результирующим действием «внутренних» сил куска, в т.ч. активности углерода, рассеянности и химсостава минеральной (зольной) части, а так же величиной открытой пористости. Результирующая «внутренних» сил может быть выражена в виде «шлакопоглощающей способности кокса».

Исследования кусков кокса после процедуры «плавление — дренаж расплава» показали (табл. 3):

- увеличение массы коксовых кусков;
- прошлаковывание кусков кокса на большую глубину;
- отличие поглощённого расплава по химическому составу от среднемассового состава шлакообразующих железорудной части, т.е. расплав «внутри» отличается от расплава «снаружи»;
- поглощённый коксовым куском шлаковый расплав интенсивно восстанавливается вплоть до образования карбидов кремния;
- величина CSR увеличивается у каменноугольных коксов и уменьшается у коксов из нефтеуглерода;
- величина CRI возрастает у коксов из нефтеуглерода и снижается у каменноугольных;
- показатель горючести (отношение теоретически необходимого количества кислорода для сжигания одной единицы массы кокса к практически затраченному количеству кислорода для сжигания одной единицы массы кокса) в потоке высоконагретого воздушного дутья резко ухудшается у каменноугольных коксов и незначительно снижается у коксов из нефтеуглерода.

Таблица 3. Результаты лабораторных замеров металлургических свойств доменных коксов в трёх состояниях: скиповый (исходное), газифицированный (после CSR и CRI) и ошлакованный (из зоны плавления ЖРЧШ)

№ п/п	Наименование производителя кокса	Величина горючести, % отн.			CSR, %		CRI, %	
		Скипов.	Газифицир.	Ошлаков.	Скипов.	Ошлаков.	Скипов.	Ошлаков.
1	«ММК»	29,2	32,0	14,9	52	58	35	31
2	«Евраз-НТМК»	29,5	33,1	16,8	56	62	32	29
3	«Мечел-Кокс»	29,6	33,1	16,9	54	61	33	31
4	«НЛМК»	29,4	32,5	17,0	58	64	31	28
5	«Алтай-Кокс»	29,2	31,9	14,8	57	61	33	30
6	«Губахинский КХЗ» 50% ДК	42,4	45,7	37,4	50	52	38	35
7	Лабораторный ДК 100	45,8	46,0	42,7	72	68	19	23

Выявленные карбиды кремния в структуре кокса (рис. 1) оказывают негативное влияние на доменный процесс, вызывая:

- непроизводительные затраты углерода кокса на образование SiC;
- ухудшение показателей горючести и теплотворной способности коксов, содержащих SiC;
- формирование негорючих и неплавких масс после газификации углерода коксов; затруднённую ассимиляцию этих масс в чугунах и промежуточных шлаках;
- ухудшение металлургических свойств конечного шлака и загрязнённость чугуна, проявляющаяся выделением «спели» на поверхности жидкого чугуна при его транспортировке в сталеплавильные цехи.

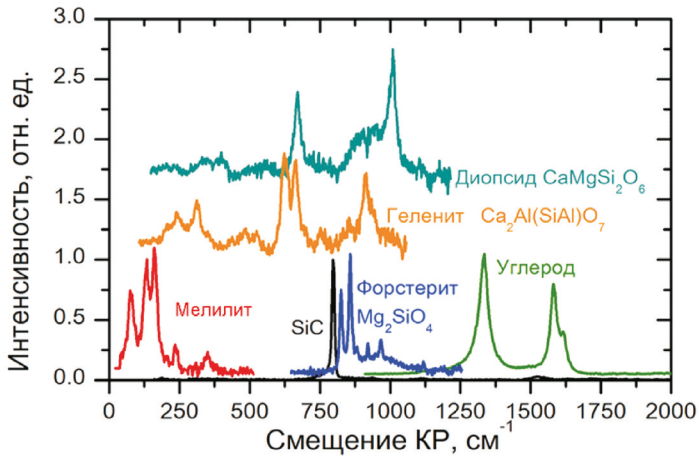
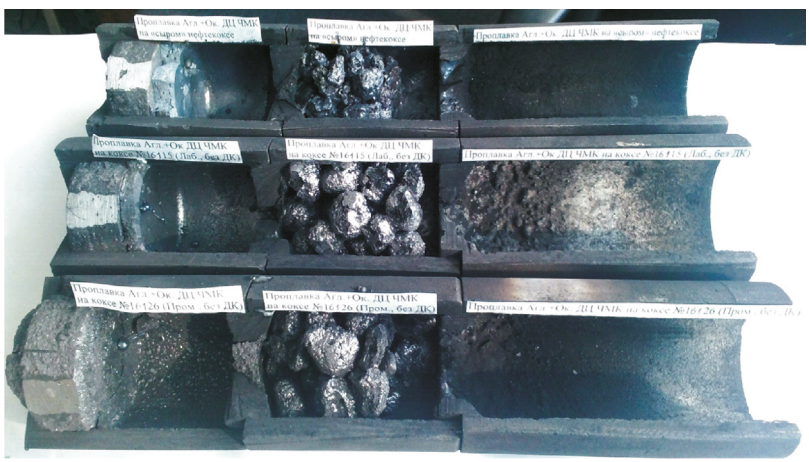
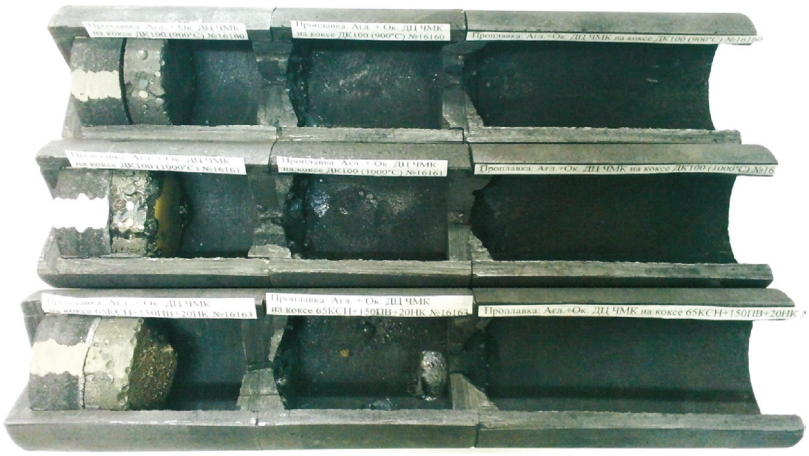


Рис. 1. Величины концентраций фазовых составляющих в зашлакованных коксах

Фотография 1. Сравнение проплавок однотипной шихты на коксах (сверху вниз): пековый, нефтекокс газифицированный, ДК 80



Фотография 2. Сравнение проплавок однотипной шихты на коксах (сверху вниз): нефтекокс, лабораторный базовый без ДК, промышленный базовый без ДК



Фотография 3. Сравнение проплавок однотипной шихты на коксах (сверху вниз): ДК 100 (коксование при 900°С), ДК 100 (коксование при 1000°С), 65 КСН-15ОПВ-20НК

Фотография 4. Сравнение проплавок однотипной шихты на коксах с добавкой угля разреза Эльга (сверху вниз): ДК 70, ДК 40, ДК 60

Раздел VII
НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА

Н.А. Заикин, Н.В. Шабля, Г.С. Подгородецкий, В.Б Горбунов, НИТУ «МИСиС»
РАЗРАБОТКА ПИЛОТНОГО ОБРАЗЦА УНИВЕРСАЛЬНОГО РЕАКТОРА БАРБОТАЖНОГО ТИПА 514

Г.С. Подгородецкий, В.Б. Горбунов, Л.А. Полулях, НИТУ «МИСиС»
А.А. Третьяк, ООО «Фирма ТАЛС»
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИТОПЛИВНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА В ПРАКТИКЕ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ЦЕХОВ 519

Н.А. Заикин, Н.В. Шабля, НИТУ «МИСиС»
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОВАРНОГО ФЕРРОНИКЕЛЯ ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ, ВЫПЛАВЛЕННЫХ ИЗ ОКИСЛЕННЫХНИКЕЛЕВЫХ РУД ЮЖНОГО УРАЛА 527

Г.С. Подгородецкий, В.Б. Горбунов, Н.А. Заикин, Н.В. Шабля, НИТУ «МИСиС»
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕГИРОВАННОГО ЧУГУНА ИЗ ОКИСЛЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ РУД ЮЖНОГО УРАЛА 531

К.И. Смирнов, ЮУрГУ
РАЗДЕЛЕНИЕ ИЛЬМЕНИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА НА ЖЕЛЕЗО И ДИОКСИД ТИТАНА ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ 535

В.Е. Рощин, ЮУрГУ
ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ КОМПЛЕКСНЫХ РУД С ПОЛУЧЕНИЕМ ПЕРВОРОДНОГО ЖЕЛЕЗА И ОКСИДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ТИТАНА И МАГНИЯ..... 539

Л.Н. Шевелев, ЦНИИЧермет
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 546

Заикин Н.А., Шабля Н.В., Подгородецкий Г.С., Горбунов В.Б., ФГАОУ ВПО «Национальный Исследовательский Технологический Университет «МИСиС»

РАЗРАБОТКА ПИЛОТНОГО ОБРАЗЦА УНИВЕРСАЛЬНОГО РЕАКТОРА БАРБОТАЖНОГО ТИПА

Черная металлургия является одной из наиболее материалоемких и энергоемких отраслей промышленности. В связи с постепенным истощением запасов ряда природных полезных ископаемых, с одной стороны, и накоплением огромного количества отходов, содержащих ценные полезные компоненты, с другой, все большую актуальность приобретает проблема использования так называемых техногенных месторождений.

Отходы, сопутствующие металлургическим переделам, включают несколько видов. Наиболее опасные из них связаны с работой металлургических агрегатов, сопровождающейся выносом пыли с отходящими газами. На стадии мокрой газоочистки эта пыль в отстойниках превращается в кашеобразную массу (шлам). При последующих переделах (разливка стали, прокатка) образуется замасленная окалина. Все эти виды отходов довольно трудно интегрировать в существующий технологический режим. Многие из них обладают большим содержанием примесных элементов (P, Zn, K, Na и т.д.), что приводит к ухудшению технологических показателей работающих агрегатов и снижению качества выпускаемой продукции [3].

На территории страны в отвалах и хранилищах накоплено более 100 млрд т твердых отходов, при этом изымаются из хозяйственного оборота сотни тысяч гектаров земель. Хранение шламов, пылей, замасленной окалины и т.д. сопряжено с катастрофическим воздействием на окружающую среду. В непосредственной близости от крупных предприятий сформированы техногенные месторождения полиметаллических руд. Экологическая опасность таких отходов резко возрастает из-за их дисперсности. Наибольшую угрозу представляют пыли и шламы, которые рассеиваются ветром при хранении [1].

Содержание в промышленных отходах полезных компонентов, иногда даже превышающих содержание их в существующих или вновь разрабатываемых месторождениях, свидетельствует об их сырьевой ценности и целесообразности использования в технологических переделах. Основным полезным компонентом отходов металлургии, включая цветную, является железо, и решение ресурсоэкологической задачи их утилизации может быть получено в черной металлургии.

Ещё одна существенная проблема, решение которой необходимо искать в чёрной металлургии, это возможность переработки отечественных марганцевых руд. На данный момент весь произведённый в России ферромарганец выплавляется из привозного сырья.

Отечественные марганцевые руды характеризуются повышенным содержанием вредной примеси — фосфора (0,2–0,3%). Значительная часть фосфора, содержащегося в марганцевых рудах, входит в состав рудного зерна, ассоциирована с марганцевыми минералами и практически не отделяется от них при обогащении руд механическими методами [4].

Вместе с развитием промышленности меняются тенденции и предпочтения к качеству первичного сырья. Благодаря освоению новых технологий, то, что вчера было отходом, сегодня является дополнительным источником сырья. Этот факт открывает новые возможности и широкий спектр использования огромного числа отходов в качестве эквивалентного заменителя более качественных полезных ископаемых.

Мировая тенденция, направленная к полному использованию ресурсов, растущие возможности использования бедных низкокачественных руд, вторичного сырья и различного рода заменителей, предполагают практически полную неисчерпаемость большинства видов минеральных ресурсов на ближайшее столетие. Для достижения такого результата необходим высокий уровень развития ресурсосберегающих технологий [2].

Таким образом, для решения задач по переработке техногенных отходов эффективным, экологически безопасным и интенсификационным способом, позволяющим не только утилизировать накопленные отходы, но и производить из них товарную продукцию передельный чугун, ферромарганец, шлак основностью 0,8–1,5, используемый для шлакокаменного литья, шлаковаты и т.д., а также вовлечению в производственные циклы отечественных низкокачественных руд. Требуются новые знания и экспериментальные данные для разработки научно-обоснованных рекомендаций и подходов по решению проблем рационального природопользования в тесном сочетании с экологической безопасностью.

Разрабатываемая пилотная установка барботажного типа позволит решить все эти существующие проблемы.

В качестве основного шихтового материала для разрабатываемой технологии являются брикеты с содержанием $Fe_{общ}$ до 57%. Высокое содержание железа в исходной шихте приводит к низким удельным технико-экономическим показателям.

Таблица 1. Расходы на производство чугуна

Наименование статьи затрат	на весь объем выпуска		
	количество	цена руб./т	сумма млн руб.
Заданное			
Руда	1730,10	3000,00	437,76
Уголь	568,44	4000,00	191,77
Флюс	12,67	500,00	0,53
Расходы по переделу			
Кислород	405,46	4000,00	195,41
ФОТ с начислениями			41,25
Расход электроэнергии	878,56	0,50	4,39
Итого себестоимость без учета попутной продукции и амортизации		9092,69	

Таблица 2. Расчет общей годовой выручки, млн руб.

Фонд рабочего времени установки, тыс. час. /год	7680
Выход шлака т/час	4,85
Выход шлака (год)	37243
Цена шлака, за т	600
Годовая реализация шлака, млн.руб	22,35
Отпуск чугуна т/час	10,98
Отпуск чугуна (год)	84342
Цена чугуна, тыс. руб./т	13500
Годовая реализация, млн руб.	1138,61
Годовая прибыль, млн руб.	141,60
Выход пара, кВт	3355,77
Пар, ГВт*год	25,77
Цена за 1 кВт	0,5
Годовая прибыль, млн. руб.	12,89
Общая годовая прибыль, млн. руб.	1 173,85

Рис. 1. Срок окупаемости

Срок окупаемости проекта 4,5 года.

Другим немаловажным преимуществом данной технологии, является возможность производства ферромарганца из российских низкосортных высокофосфористых руд. В качества исходного сырья использовали Усинского месторождения марганцевых руд с содержание Mn = 47,9%.

За счёт создания в зоне восстановления условий, способствующих удалению фосфора из оксидного расплава, что подтверждено двумя патентами: № 2541239, № 2542050, появляется возможность вовлекать в продукты переработки не только высококачественные руды и концентраты, но и низкокачественные марганецсодержащие руды (имеющие высокое соотношение фосфора к марганцу). При этом загрязнённые фосфором железосодержащие техногенные отходы также рафинируются в данной зоне. Всё это способствует получению кондиционных по фосфору товарных продуктов, которые будут обладать низкой себестоимостью (относительно своих конкурентов) за счёт вовлечения в качестве шихты низкосортного дешёвого сырья, а в случае использования качественного сырья — получать особо чистые марки чугунов.

Таблица 3. Расходы на производство ферромарганца

Наименование статьи затрат	на весь объем выпуска		
	количество	цена руб./т	сумма млн. руб.
Заданное			
Руда	3397,81	5000,00	768,00
Уголь	891,61	4000,00	161,22
Флюс	50,34	500,00	1,14
Расходы по переделу			
Кислород	960,56	4000,00	248,13
Расход электроэнергии	470,89	0,50	2,35
ФОТ с начислениями			41,25
Итого себестоимость без учета попутной продукции и амортизации		24422,17	

Таблица 4. Расчет общей годовой выручки, млн. руб.

Фонд рабочего времени установки, тыс. час. /год	7680
Выход шлака т/час	7,51
Выход шлака (год)	57710,76
Цена шлака, за т	600
Годовая реализация шлака, млн.руб	34,63
Отпуск ферромарганца т/час	5,89
Отпуск ферромарганца (год)	45206
Цена ферромарганца, тыс. руб./т	48700
Годовая реализация, млн руб.	2201,51
Годовая прибыль, млн руб.	855,88
Выход пара, кВт	3667,86
Пар, ГВт*год	28,17
Цена за 1 кВт	0,5
Годовая прибыль, млн. руб.	14,08
Общая годовая прибыль, млн. руб.	2 250,22

Срок окупаемости 4,5 года.

Предлагаемая технология переработки техногенных отходов является уникальной разработкой. Во-первых, впервые применяется разделение рабочей зоны печи. Во-вторых, применяется дожигание отходящих газов с помощью фурм верхнего ряда. В-третьих, технология позволяет использовать шихтовые материалы с различным содержанием ведущего элемента, а также крупность от 5 до 100 мм.

Полностью закрытая технология, где все полезные элементы (цинк, свинец и т.д.), удаляющиеся из жидкой ванны вместе с отходящими газами, улавливающимися на стадии газоочистки, предоставляет возможность выхода на новые рынки сбыта торговой продукции (химическая промышленность, цветная металлургия и т.д.).

Рис. 2. Срок окупаемости

Список литературы

1. Протасов В.Ф. Экология, здоровье и охрана окружающей среды в России. — М.: Финансы и статистика, 2001.
2. Гудим Ю.А., Голубев А.А. Эффективные способы утилизации отходов металлургического производства Урала // Экология и промышленность России. — 2008. — №12.
3. Развитие бескоксовой металлургии / Тулин Н.А., Кудрявцев В.С., Пчелкин С.А. и др. / Под ред. Тулина Н.А., Майера К. — М.:Металлургия, 1987. — 328 с.
4. Экспериментальное изучение механизма удаления фосфора из оксидных расплавов системы $CaO–SiO_2–MgO–Al_2O_3–P_2O_5$ в газовую фазу / Краснянская И.А., Подгородецкий Г.С. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. 2014. № 5. С. 41–46.

Г.С. Подгородецкий, В.Б. Горбунов, Л.А. Полулях,
Научно-образовательный центр «Новые металлургические технологии», НИТУ «МИСиС»
А.А. Третьяк, Генеральный директор ООО «Фирма ТАЛС»

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИТОПЛИВНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА В ПРАКТИКЕ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ЦЕХОВ

Проведен анализ использования пылеугольного топлива (ПУТ) в практике работы доменных печей РФ. Показано, что достигнутый уровень вдувания ПУТ значительно ниже, чем в лучших мировых практиках. Приведены факторы, затрудняющие развитие этого направления в России. Проанализированы мероприятия, предлагаемые для снижения выбросов углекислого газа при производстве чугуна (программа ULCOS). Предложено ввести в состав доменных цехов политопливные газогенераторы барботажного типа для производства горячих восстановительных газов (ГВГ) с целью их последующего вдувания в доменные печи. Выполнен расчет показателей работы доменной печи объемом 1033 м^3 с вдуванием до 400 нм^3/т чугуна ГВГ. При вдувании 400 нм^3/т ГВГ экономия кокса составляет 100–120 кг/т чугуна. Ожидаемая экономия кокса при вдувании 700 нм^3/т ГВГ — до 200 кг/т чугуна. Предложено создать консорциум ведущих металлургических предприятий для отработки предлагаемой технологии в опытно-промышленном масштабе.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с принятием Россией международного обязательства по сокращению выбросов парниковых газов на 25% к 2020 году по сравнению с 1990 г. (указ Президента РФ № 257 от 30 сентября 2013 г.) актуальна проблема реализации энергосберегающих технологий, особенно в такой энергоемкой отрасли, как черная металлургия [1].

В настоящее время в мировой практике производства чугуна широко применяется вдувание пылеугольного топлива (ПУТ) в доменные печи,

позволяющее снизить расход кокса на 150–200 кг, т чугуна [2]. Технология отработана в промышленном масштабе, но не лишена серьезных недостатков. Недостатки технологии вдувания ПУТ: высокие капиталовложения, очень серьезные требования к качеству шихтовых материалов, качеству кокса и вдуваемых углей. В условиях РФ требования к высокому качеству железорудных материалов и кокса практически не выполняются [3]. Невысокий уровень вдувания ПУТ, связанный с сырьевыми проблемами России, не позволяет окупать значительные капиталовложения в строительство капиталоемких установок.

В условиях НПО «Тулачермет» были проведены опытно-промышленные испытания по отмывке колошникового газа от CO_2 с последующим нагревом и вдуванием полученного горячего восстановительного газа в доменные печи. Расход кокса в опытный период снижался до 350 кг/т чугуна [1]. В XXI веке аналогичные промышленные эксперименты были проведены консорциумом крупнейших металлургических корпораций и научно-исследовательских институтов на опытно-промышленной доменной печи. Исследования, проведенные в рамках снижения выбросов CO_2 (программа ULCOS) показали перспективность этого направления. Достигнута экономия кокса и снижение выбросов углекислого газа до 35% [4].

Несмотря на перспективность этого направления, рециклинг колошниковых газов в мире и в РФ тормозится рядом обстоятельств, прежде всего по причине полного использования колошниковых газов в энергосетях комбинатов [5]. В этом случае рециклинг колошникового газа нецелесообразен, т.к. надо замещать дефицит технических газов природным газом, лимиты на который и так выбираются полностью.

В мире широко распространены технологии газификации углей. Произведенный генераторный газ может использоваться в качестве энергоносителя для производства электрической и тепловой энергии, использоваться в качестве энергоносителя на предприятиях черной и цветной металлургии, использоваться в качестве ГВГ для вдувания в доменные печи. Одним из наиболее перспективных разновидностей технологии газификации углей является их газификация в жидком шлаковом расплаве, в так называемых барботажных печах. В данной работе предлагается использовать политопливные газогенераторы для производства ГВГ с последующим вдуванием их в доменные печи [6].

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ РФ В 2016 Г.

За первое полугодие 2016 г. доменными печами РФ было произведено 29, 95 млн. т чугуна. Средний расход кокса на сухую массу составил 413,2 кг/т. чугуна, расход каменного угля — 20,6 кг/т, расход природного газа — 96,7 нм^3/т Из приведенных данных видно, что вдувание ПУТ в РФ находится на минимальном уровне. Содержание железа в железорудной части шихты, расходы кокса и ПУТ на металлургических комбинатах РФ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительные данные по расходу кокса, вдуванию ПУТ на металлургических предприятиях РФ

Комбинат	Fe ЖРЧШ, %	Кокс, кг/т	ПУТ, кг/т
ЧерМК	61,6	404,1	17,7*
НЛМК	57,93	370,7	49,1
ММК	58,3	446,6	–
ЕВРАЗ НТМК	57,6	369,0	44,0
ЕВРАЗ ЗСМК	57,33	430,2	39,8
“Тулачермет”	58,7	445,2	–
“Урал. Сталь”	55,5	466,6	–
Чел. МК	Н.д.	452,0	–
Надеждинский МЗ	55,5	452,0	–
Среднее, РФ	–	413,2	20,6

* — Загрузка кускового угля в доменные печи

Из данных, приведенных в таблице видно, что наилучшие показатели по суммарному расходу кокса характерны для ОАО «Северсталь», ОАО «НЛМК», ОАО «ЕВРАЗ НЛМК». Наибольшее количество ПУТ вдувается на НЛМК и НТМК (49,1 и 44,0 кг/т чугуна соответственно) [7].

Для сравнения в 2013 г. в КНР средний расход кокса составил 362 кг/т чугуна, среднее количество вдуваемого ПУТ — 149 кг/т [12]. Такие высокие показатели работы доменных печей КНР связаны с использованием высококачественных импортных сырьевых материалов. Так импорт железной руды в КНР в 2013 г. составил 813 млн. т (более 70% от потребления), импорт коксующихся углей в 2014 г. составил 126 млн. т (около 50% от потребления) [6]. В условиях РФ достижение таких показателей по вдуванию ПУТ затруднено, что связано с особенностями сырьевой базы и значительными логистическими затратами.

На рис. 1 приведены энергетические затраты при производстве чугуна на предприятиях РФ в первом полугодии 2016 г. Наилучшие удельные расходы условного топлива наблюдается на предприятиях: ЕВРАЗ НТМК, «Тулачермет», НЛМК и ЧерМК. Средняя величина энергоемкости передельного чугуна по РФ составила 656,3 кг у.т./т чугуна [7].

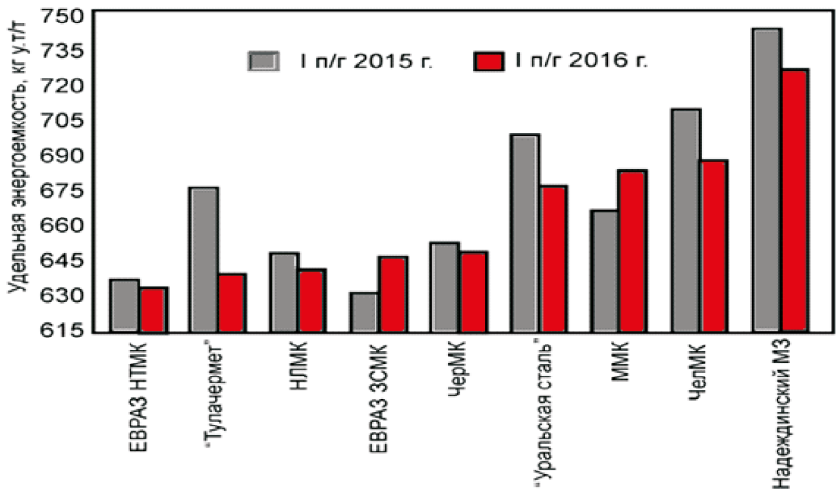


Рис. 1. Удельная энергоемкость передельного чугуна на предприятиях РФ

Из приведенных выше данных, а также учитывая сложности эксплуатации доменных печей, использующих для вдувания ПУТ, можно сделать вывод о необходимости поиска альтернативных путей снижения расхода кокса в доменных печах. Одним из вариантов снижения расхода кокса является вдувание ГВГ.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГВГ

Ранее упоминалось, что вдувание горячих восстановительных газов (ГВГ) позволяет радикально снизить расход кокса. Важное мировое направление радикального снижения расхода кокса — программа ULCOS, направленная на снижение выбросов CO2 при производстве чугуна [4]. Программа ULCOS предусматривает вдувание нагретых восстановительных газов в фурмы и шахту доменных печей. Технология опробована, получена значительная (до 35%) экономия кокса. В нашей стране подобная технология в 1989–1990 г.г. прошла опытно-промышленную проверку на «Тулачермет». Колошниковый газ отмывали от CO_2, нагревали и вдували в горн печи через фурмы. Расход кокса был снижен до 350 кг/т чугуна. То есть направление вдувания ГВГ прошло предварительную опытно-промышленную проверку и показало свою перспективность [8].

В данной работе предлагается разместить рядом с доменной печью газогенератор, работающий под давлением 4–6 ати. Выходящие из газогенератора газы (ГВГ) будут иметь температуру 1500–1600°C

и химический состав: $CO + H_2 = 85–90\%$, $N_2 + CO_2 + H_2O = 10–15\%$. Далее восстановительные газы будут проходить первичную очистку (скруббер) и подаваться в существующие фурмы доменной печи через футерованный газопровод. Ориентировочная температура ГВГ на входе в доменную печь — 1200–1400°С.

В качестве газогенератора предлагается использовать политопливный газогенератор барботажного типа, разработанный в НИТУ «МИСиС» [6]. В мире существует значительное количество технологий газификации углей. К ним относятся:

- Газификатор Лурги.
- Газификатор Винклера.
- Газификаторы Копперс-Тотцек, Шелл-Копперс.
- Технология газификации Коноко-Филипс
- Технологии газификации Сименс.
- Газификатор на базе процесса РОМЕЛТ.

Подробный анализ этих технологий газификации приведен в работе [9].

Отметим недостатки, присущие рассматриваемым технологиям. К ним относятся:

- Потребность в значительных капиталовложениях, окупаемых только при строительстве крупных установок.
- Возможность переработки узкого круга углей, ограниченного маркой и крупностью углей.
- Наличие собственных вторичных отходов (зола, отвальный шлак).
- Невозможность переработки широкого спектра различных видов твердого топлива.
- Недостатки конструкции, необходимость промежуточного охлаждения и компремирования генераторных газов (РОМЕЛТ).
- Недостаточная экологическая чистота технологий, наличие экотоксикантов в продуктах переработки.

Практически все эти недостатки устранены в политопливном газогенераторе конструкции НИТУ «МИСиС». Газогенератор нового поколения будет позволять эффективно перерабатывать широкий спектр наиболее дешевых углей и другого низкосортного твердого топлива в генераторный газ и/или электроэнергию. В отличие от многих современных технологий сжигания углей, зола в политопливном газогенераторе переходит в шлак и далее — в товарные продукты. На базе предлагаемой технологии также возможна реализация совместной твердого топлива со специально подготовленными ТБО [10]. Основные элементы конструкции политопливного газогенератора приведены на рис. 2.

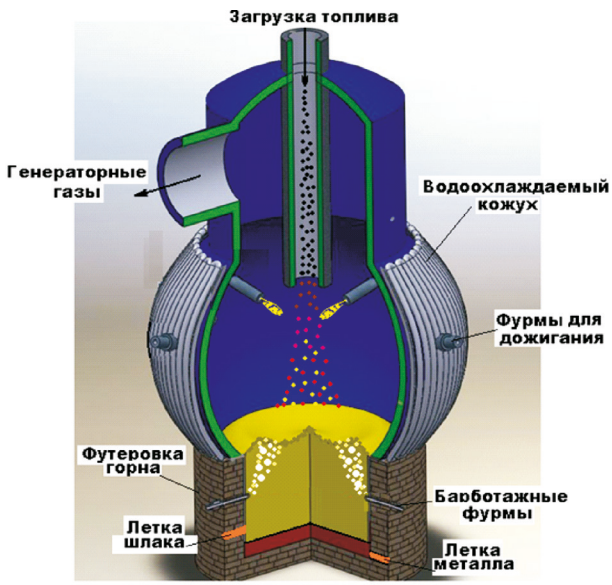


Рис. 2. Политопливный газогенератор конструкции НИТУ «МИСиС»

Технология газификации углей в слое расплавленного шлака приведена в работах [11, 13, 14]. Отработка технологии газификации осуществлялась на опытно-промышленной печи РОМЕЛТ на НЛМК. В ходе опытных компаний было показано, что в слое барботируемого шлака возможно получать генераторный газ, остаточное содержание окислительных газов и азота в котором не превышает 10–15%. Главными недостатками печи РОМЕЛТ является ее конструктивные особенности и работа под разряжением. Эти недостатки устранены в конструкции политопливного газогенератора. Изменена форма, и предусмотрена работа газогенератора под давлением 4–6 ати.

Другой отличительной особенностью политопливного газогенератора является возможность работы практически на любых видах твердого топлива. Схема установки политопливного газогенератора приведена на рис. 3.

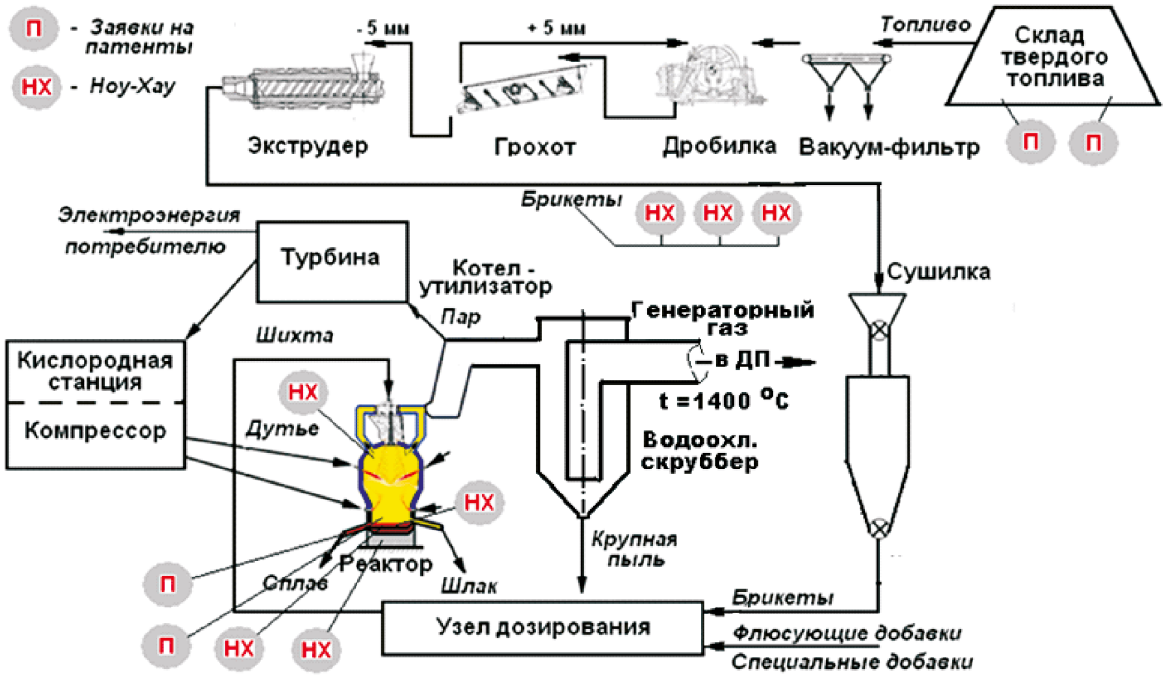


Рис. 3. Схема установки политопливного газогенератора

В качестве сырьевых материалов могут быть использованы:

- любые марки углей;
- отходы углеобогащения;
- торф;
- горючие сланцы;
- отходы деревообработки;
- биомасса;
- отходы нефтепереработки;
- твердые бытовые отходы.

Продуктами переработки являются:

- генераторный газ;
- шлак;
- металлический сплав;
- пар энергетических параметров.

В качестве продукта переработки может быть также металлический сплав на базе чугуна. Это важно при переработке топлива, содержащего повышенное содержание железа в золе. Другим вариантом использования политопливного газогенератора является возможность использования железосодержа-

щих отходов, количество которых определяется тепловым состоянием газогенератора и возможностью повышать содержание окислительных газов в доменную печь.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВДУВАНИЯ ГВГ В ДОМЕННЫЕ ПЕЧИ

Расчеты выполнены на балансовой модели «Расчет показателей работы доменных печей» кафедры энергоэффективных ресурсосберагеющих промышленных технологий НИТУ «МИСиС». Методика базируется на расчетной модели Риста (модель Курунова — Ященко) [15]. Моделирование проводили для условий доменной печи объемом 1033 м^3.

Исходные данные для моделирования:

Химический состав шихтовых материалов принят для условий ММК.

Рудная смесь: агломерат (70%) и окатыши (30%).

Содержание железа в агломерате — 52,2%, в окатышах — 62,5%.

Основность ($(CaO + MgO)/(SiO_2 + Al_2O_3)$) : агломерата — 2,13, окатышей — 0,38.

Содержание золы в коксе — 11,94%, серы — 0,52%.

Горячее дутье содержало 21% кислорода, температура — 1120 °С.

Содержание кремния в чугуне — 0,74%.

Температура ГВГ для всех вариантов принята на уровне 1200 °С.

Состав ГВГ:

1 — 70% CO, 20% H_2, $N_2 + CO_2$ = 10% (сухое топливо);

2 — 45% CO, 45% H_2, $N_2 + CO_2$ = 10% (влажное топливо).

Результаты расчетов приведены в табл. 2

Таблица 2. Результаты расчета показателей работы доменной печи при вдувании ГВГ

Параметры База		Варианты						
		1	2	3	4	5	6	
Расход ГВГ, нм^3/т		0	102,6	102,6	205,1	205,1	410,3	410,3
Химический состав ГВГ,%	CO	–	70,0	45,0	70,0	45,0	70,0	45,0
	H_2	–	20,0	45,0	20,0	45,0	20,0	45,0
	CO_2	–	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	N_2	–	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Температура ГВГ, °С		–	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Результаты расчета								
Производительность, т/сут.		1335,0	1347,8	1356,0	1358,1	1380,4	1376,2	1421,4
Расход кокса, кг/т		496,0	471,4	469,7	447,3	443,5	399,2	391,7
Коэффициент замены кг/нм^{3*}			0,240	0,256	0,237	0,256	0,236	0,254
Расход воздушного дутья, нм^3/т		1233,1	1189,0	1196,3	1143,4	1157,5	1049,1	1074,2
Выход шлака, кг/т		415,9	413,5	413,4	411,1	410,8	406,5	405,9
Основность шлака**		1,41	1,42	1,42	1,44	1,44	1,47	1,48
Выход колошник. газа, нм^3/т		1918	1931	1927	1945	1935	1975	1955
Темп. колошникового газа, °С		214,5	230,3	227,0	246,6	239,2	278,5	265,3
Химический состав колошникового газа,%	CO	21,09	22,46	21,70	23,8	22,31	26,40	23,45
	CO_2	19,98	20,45	20,05	20,90	20,15	21,81	20,36
	H_2	3,78	4,34	5,04	4,90	6,38	6,02	9,08
	N_2	55,15	52,75	53,21	50,40	51,17	45,76	47,11

Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что вдувание ГВГ на уровне до 400 нм^3/т чугуна приводит к существенному снижению расхода кокса (до 104 кг/т чугуна). При этом расход дутья снижается на 200–220 нм^3/т, расход шлака снижается на 10 кг/т. Важно отметить, что производительность печи во всех вариантах не снижается. Несколько возрастает выход и калорийность колошникового газа.

По результатам расчетов можно сделать следующие промежуточные выводы:

1. Для печи объемом 1033 м^3 достаточен (по выходу ГВГ ~35000 нм^3/час) газогенератор площадью 5 м^2.
2. При вдувании 400 нм3 ГВГ на 1т чугуна снижение расхода кокса доходит до 104 кг.
3. Можно снижать расход кислорода и горячего дутья без потери производительности доменных печей. Высвобождающийся энергоносители при этом могут вдуваться в газогенератор.
4. В программе ULCOS объемы вдуваемых ГВГ на опытной печи доводили до 700 нм^3/т чугуна, и проблем с газодинамикой не было. В этом случае возможная экономия кокса будет доходить до 150–180 кг/т.

Следующим этапом развития предлагаемой технологии является опробование в опытно-промышленном масштабе политопливного газогенератора. В настоящее время НИТУ «МИСиС», ООО «НМТ» совместно с ООО «ПК Вторалюминпродукт», ООО « ПК МЕТПРОМ», ООО «Энерготерм Система» выполнены проектные работы и заканчивается монтаж пилотной установки универсального барботажного реактора в г. Мценске, Орловской области. Основное финансирование проектных работ, закупки узлов, комплектующих и монтажа оборудования пилотной установки осуществлялось ООО «ПК Вторалюминпродукт» без привлечения государственного финансирования. Запуск установки запланирован в 2017 году. На пилотной установке планируется опробование в опытно-промышленном масштабе технологии политопливного газогенератора и отработка режимов работы при газификации различных видов твердого топлива.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОЕКТА

- Отработка на пилотном реакторе (г. Мценск) в опытно-промышленных масштабах технологий безотходной технологии газификации:
  — низкосортных марок углей;
  — отходов углеобогащения;
  — торфа;
  — горючих сланцев;
  — отходов деревообработки и сельскохозяйственных отходов;
  — биомассы;
  — отходов нефтепереработки;
  — твердых бытовых отходов.
- Дооснащение пилотной установки оборудованием для подготовки генераторного газа.
- Создание консорциума ведущих металлургических предприятий для опытно-промышленной отработки технологии вдувания ГВГ в доменные печи.
- Разработка рабочего проекта политопливного газогенератора и комплекса для подачи ГВГ в доменные печи.
- Строительство и запуск в эксплуатацию опытно-промышленного комплекса по вдуванию ГВГ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.278.21.0065 от 20.102014 г., уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57814X0065

Список литературы

1. Soskovets O.N., Shevelev L.N., Shatlov V.A., Marsuverskii B.A., Eremin V.I., Roginko S.A. Improving the energy efficiency of blast furnaces by means of hot reducing gases. Steel in Translation, 2014, Vol. 44, No. 5, pp. 394–398.

2. М. Геердес, Р. Ченьо, И. Курунов, О. Лингарди, Д. Риккетс Современный доменный процесс. Введение. М.: ООО «Металлургиздат», 2016 г. 274 с. ISBN 978-5-902194-84-2
3. Требования, предъявляемые к качеству шихтовых материалов // http://www.metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/domennaya-pech/397-trebovaniya-pred-yavlyaemye-k-kachestvu-shikhtovykh-materialov.html
4. Ян ван дер Стел, Г. Лоуверсе, Д. Серт, А. Хирш, н. Эклунд. Доменная печь ULCOS с рециклингом колошникового газа для минимизации выбросов CO2 — окончательный результат испытаний. Steel Times International на русском языке — Сентябрь 2013, стр. 36–38.
5. Шульц Л.А. Энерго-экологические интегральные показатели производства стали // Экология и промышленность России, 2004. Июль. С. 30–33.
6. Разработка технологии и технических решений политопливного газогенератора на базе местных и возобновляемых топливных ресурсов // https://xpir.ru/conference2015/theses/14.578.21.0065
7. Петракова Т.М. Основные показатели работы черной металлургии за период первое полугодие 2016 г. «Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации». 2016, № 10 , стр. 3–9.
8. Леонид Шевелев: Наибольший потенциал снижения выбросов парниковых газов — в доменном производстве // http://www.time-innov.ru/page/press/overall/article/393
9. G.S. Podgorodetskii, Yu.S. Yusfin†, A.Yu. Sazhin, V.B. Gorbunov, and L.A. Polulyakh Production of Generator Gas from Solid Fuels. Steel in Translation, 2015, Vol. 45, No. 6, pp. 395–402.
10. Метод утилизации твердых бытовых отходов в печи с барботируемым шлаковым расплавом // http://misis.ru/spglnk/9fc62f77.
11. Иванова И.М. Использование материальных и энергетических ресурсов. «Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации». 2016, № 10 , стр. 9–15.
12. Xuegong Bi, Shourong Zhang/ The Past. The Present and the Prospects of Iromaking In China. Proceeding of the 7-th International congress of Ironmaking Technologies. AIST 2015. Volume, 1. P. 1472–1480.
13. Процесс Ромелт, под ред. В.А. Роменца. — М.: МИСиС, Издательский дом «Руда и Металлы», 2005.
14. Газификация угля в шлаковом расплав / под ред. Усачева А.Б. — М.: «Институт Стальпроект», 2008, 288 с.
15. Вегман Е.Ф., Жеребин Н.Ф., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С., Курунов И.Ф., Пареньков А.Е., Черноусов П.И. Металлургия чугуна: Учебник для вузов / Под редакцией Ю.С. Юсфин. — М.: Академкнига, 2004. — 774 с.

Заикин Н.А., Шабля Н.В., «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОВАРНОГО ФЕРРОНИКЕЛЯ ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ, ВЫПЛАВЛЕННЫХ ИЗ ОКИСЛЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ РУД ЮЖНОГО УРАЛА

В качестве никельсодержащего компонента конвертерной плавки предлагается использовать легированный никелем чугун, полученный в печи жидкофазного восстановления ПМ 6, разработанной на кафедре ЭРПТ НИТУ «МИСиС».

Содержание основных химических элементов представлено в табл.1

Таблица 1. Химический состав образца легированного чугуна

Компонент	Содержание,%
$Fe_{общ.}$	83,8
C	4,06
Si	1,03
Al	0,16
Cu	0,012
Cr	0,094
Mn	0,045
Ni	6,31
V	0,0033
Ti	0,0082
S	0,0041
P	0,034
Co	0,6

Из материального баланса известно, что каждые 100 кг чугуна, внесенные в кислородную плавку позволят получить 45,47 кг годного ферроникеля и 72,28 кг шлака. Учитывая эти доли и производительность по чугуну можно сказать о том, что производительность по ферроникелю будет составлять 21 тыс. т/год, а по шлаку — 33 тыс. т/ год.

В результате образования большого количества шлака необходимо рассмотреть технологию переработки шлака с получением передельного чугуна.

Переработку шлака предлагается перерабатывать в меньшей по объему печи барботажного типа. Хим. состав продуктов плавки представлен в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Химический состав чугуна

Компонент	Содержание, %
Fe	93,07
C	4,50
Si	0,24
Cr	0,10
Mn	0,01
Ni	1,53
P	0,002
Co	0,53
прочие	0,01
Всего:	100,00

Таблица 3. Химический состав шлака

Компонент	Содержание,%
FeO	2,00
SiO_2	52,35
Al_2O_3	4,19
CaO	34,70
Cr_2O_3	0,03
MgO	0,63
MnO	0,21
SO_3	0,0001
P_2O_5	0,013
As_2O_5	0,03
CoO	0,16
прочие	5,735
Всего:	100,06

Годовой выход чугуна и шлака при заданном объеме перерабатываемого конвертерного шлака будет составлять 21 и 10 тыс. т соответственно.

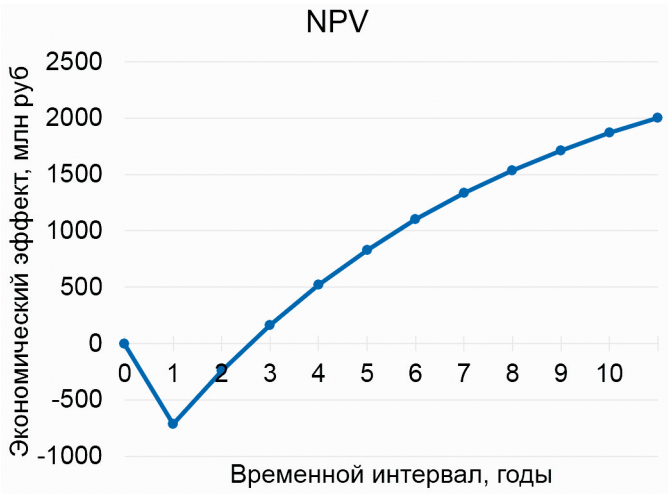


Рис. 1. NPV проекта

Капитальные затраты на воплощение данной технологию в жизнь будут включать в себя затраты на постройку двух агрегатов типа ПМ6: для основного передела и переработки шлака и в сумме принимаются 13 млн $. При принимаемой ставке дисконтирования 15%, период окупаемости будет находиться в пределах трех лет, как видно из графика, изображенного на Рис. 1.

С целью подтверждения расчетных данных был проведен эксперимент, целью которого была задача сымитировать конвертерный процесс в лабораторных условиях, в рамках которого, мы ожидали получить металл с большим, содержанием никеля, по сравнению с исходным чугуном, и шлак, богатый FeO, так как для повышения содержания никеля в металле необходимо окислить большую часть железа.

Для этого в ванну с расплавленным чугуном подавался кислород. За все время продувки

было отобрано три пробы и вдуто 283 л технического кислорода. В третьей пробе не было найдено включений металла, а хим. анализ дал понять, что весь этот расплав является шлаком, который образовался в результате окисления основных элементов расплава. Этот образец является подтверждением того, что усвоение кислорода ванной происходит активно, без значительных потерь, связанных с невозможностью кислорода преодолеть поверхностное натяжение металла.

Необходимо, также отметить, что, изучив пробу № 2, хорошо видно, что содержание FeO в шлаке меньше ожидаемого практически в два раза, а количество никеля в металле ниже, но в тоже время больше чем в образце при расплавлении. Это говорит о том, что кислорода, вдутого к моменту отбора этой пробы было недостаточно, но присутствует тенденция к намеченному сценарию окисления железа и росту содержания никеля в металле. Таким образом, металл с заданным содержанием никеля, можно получить, продув ванну количеством кислорода, которое лежит в интервале между второй и третьей пробой.

Хим. состав составляющих пробы № 2 представлен в табл.4 и 5. Изменение содержания отдельных компонентов в металле и шлаке пробы № 2 представлено на диаграммах, изображенных на Рис. 2 и 3.

Таблица 4. Химический состав металла пробы № 2

Элемент	Расчетные данные, %	Опытные данные, %
Si	0,071	
Mn	0,018	
S	0,005	0,0036
P	0,0055	
Ni	12,719	7,64
Cu	0,026	
Co	0,715	
V	0,008	
Cr	0,086	0,068
Fe	86,348	84,5
C	0,1	0,096

Таблица 5. Химический состав шлака пробы № 2

Компонент	Расчетные данные, %	Опытные данные, %
CaO	10,82	
SiO_2	3,38	
MnO	0,07	
P_2O_5	0,1	
NiO	1,33	0,005
CuO	0	
CoO	0,51	
V_2O_5	0	
Cr_2O_3	0,11	4,09
Прочие	1,67	
Fe_2O_3	0	
FeO	82	56,19
Всего	100	

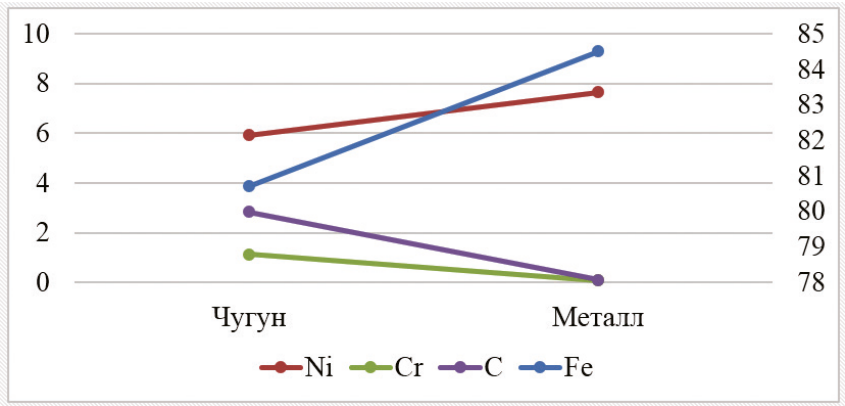


*Рис. 2. Изменение содержания элементов в металле через 20 минут продувки**

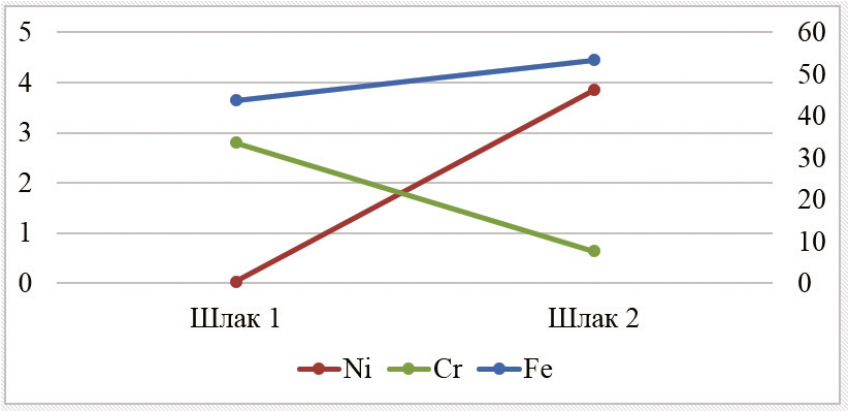


*Рис. 3. Изменение содержания элементов в шлаке через 20 минут продувки**

**Fe на Рис. 2 и 3 изображены со значениями по вспомогательной оси справа*

Таким образом результаты этих экспериментов позволяют считать технологию получения ферроникеля из окисленных никелевых руд с применением печи жидкофазного жизнеспособной и подтверждает достоверность результатов расчетов параметров плавки в барботажной печи с применением латеритовых руд.

По данной теме зарегистрировано 3 ноу-хау по темам переработки конвертерного шлака и подготовки руды к плавке № 22-001-2014, № 23-001-2014, № 23-001-2014.

Список литературы

1. Худяков И.Ф., Тихонов А.И., Деев В.И., Набойченко С.С. Металлургия никеля и кобальта — М.: «Металлургия», 1977. — 264 с. Khudyakov I.F., Tikhonov A.I., Deev V.I., Naboichenko S.S. Metallurgiya nikelya i kobal'ta — M.: «Metallurgiya», 1977. — 264 p.
2. Диомидовский Д.А., Онищин Б.П., Линев В.Д. Металлургия ферроникеля — М.: «Металлургия», 1983. — 184 с. Diomidovskii D.A., Onishchin B.P., Linev V.D. Metallurgiya ferronikelya — M.: «Metallurgiya», 1983. — 184 p.
3. Певзнер Г.З., Теслицкая М.В. Цветная металлургия — М.: «Цветметинформация», 1969, № 23, С. 16–25. Pevzner G.Z., Teslitskaya M.V. Tsvetnaya metallurgiya — M.: «Tsvetmetinformatsiya», 1969, № 23, p.16–25.
4. Корнилов И.И. Никель и его сплавы. Изд-во. АН СССР, 1958. — 340 с. Kornilov I.I. Nikel' i ego splavy. Izd-vo. AN SSSR, 1958. — 340 p.

Подгородецкий Г.С., Горбунов В.Б., Заикин Н.А., Шабля Н.В.
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕГИРОВАННОГО ЧУГУНА ИЗ ОКИСЛЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ РУД ЮЖНОГО УРАЛА

В качестве железо- и никельсодержащего сырья была выбрана руда Буруктальского месторождения, которое располагается в восточной части Оренбургской области. Эта руда характеризуется небольшим содержанием никеля — около 1%. Технологическая цепочка предполагает использование двухзонного агрегата жидкофазного восстановления ПМ6, разработанного на кафедре ЭРПТ НИТУ «МИСиС».

Содержание основных химических элементов представлено в табл. 1

Таблица 1. Химический состав образца Буруктальской руды

Компоненты	%
$Fe_{общ.}$	30,680
Fe_2O_3	43,828
SiO_2	32,205
NiO	1,845
P_2O_5	0,024
S	0,066
Прочие	0,031

Параметры печи: загрузка по руде 15850 кг/час, удельный расход дутья на нижние фурмы в каждой зоне, 750 $м^3/(м^2 \cdot час)$, основность шлакового расплава 0,7, температура шлакового расплава 1500 °С.

При заданных параметрах печи расход руды на тонну легированного чугуна будет составлять 3038 кг/т, флюса 884 кг/т, угля 700 кг/т, тех. Кислорода 827 м³/т, воздуха 1045 м³/т. Годовой выход по чугуну и шлаку на уровне 45 и 87 тыс. т.

Хим. состав продуктов плавки приведен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав продуктов плавки

Чугун		Шлак	
Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, %
Fe	88,42	FeO	2,00
C	4,50	SiO_2	50,69
Si	0,94	Al_2O_3	6,54
Cr	1,29	CaO	24,88
Mn	0,22	Cr_2O_3	0,11
Ni	4,28	MgO	14,57
S	0,003	MnO	0,83
P	0,001	TiO_2	0,17
Co	0,30	S	0,0001
Всего:	100,00	P_2O_5	0,002

Себестоимость такого чугуна оценивается в 14 700 руб./т.

На этом этапе реализация его как продукта видится нецелесообразным, в связи с чем предлагается отдавать его для конвертерного передела на ферроникель, поэтому в рамках этой работы не рассматривается экономический эффект проведенных мероприятий.

Целью первого опыта было сымитировать условия и процессы, происходящие в плавильной зоне двухзонного агрегата. Назначение этой зоны состоит в расплавлении шихты и удалении вредных примесей: серы и фосфора. Для этого было необходимо обеспечить достаточную температуру для расплавления шихты и подачу газов для продувки, чтобы добиться барботирования расплава.

Анализ всех трех проб представлен в табл. 3.

Таблица 3. Хим. состав проб эксперимента № 1

Элемент	Проба, №		
	1	2	3
Al, %	2,35	2,96	3,91
Ca, %	1,91	1,73	1,63
Co, %	0,10	0,097	0,094
Cr, %	0,48	0,43	0,33
Cu, %	0,009	0,014	0,023
Fe, %	23,3	22,8	22,7
K, %	0,050	0,050	0,098
La, %	0,005	0,005	0,005
Mg, %	5,99	5,89	5,90
Mn, %	0,55	0,51	0,49
Na, %	0,20	0,20	0,21
Ni, %	1,15	1,09	1,04

Элемент	Проба, №		
	1	2	3
P, %	0,030	0,030	0,025
Sc, %	0,0020	0,0018	0,0018
Sr, %	0,0013	0,012	0,014
Ti, %	0,043	0,044	0,050
V, %	0,024	0,023	0,022
Y, %	0,0029	0,0028	0,0032
Zn, %	0,023	0,029	0,025
Zr, %	0,0016	0,0011	0,0014
Si, %	17,3	18,5	19,9
C, %	0,077	0,061	0,0039
S, %	0,0082	0,0039	0,0039
As, %	< 0,05	< 0,05	< 0,05

Из диаграммы, представленной на Рис. 1 ясно видно, что содержание вредных примесей с течением продувки снизилось. По сравнению с содержанием в руде можно говорить об уменьшении доли серы в 15,6 раз. Для фосфора наблюдается обратная тенденция, с ростом в 1,5 раза, не смотря на уменьшение с течением продувки. Основная задача стояла в удалении вредных примесей, поэтому можно сказать, что в лабораторных условиях удалось создать необходимые условия, схожие с происходящими в плавильной зоне печи ПМ6 для окисленной никелевой руды.

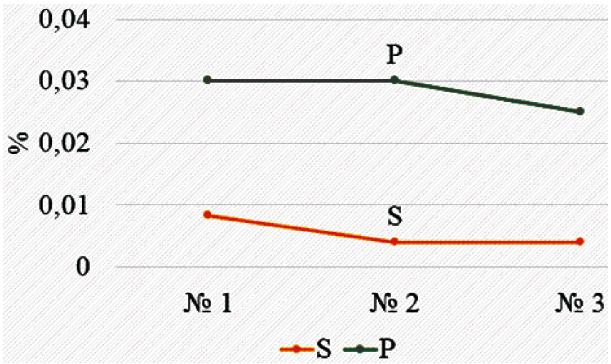


Рис. 1. Диаграмма изменения содержания S и P в образце

Назначение второй зоны агрегата состоит в восстановлении оксидов и удалении вредных примесей. Для плавки был выбран расплав, полученный в результате вышеописанного эксперимента. Восстановительные условия были обеспечены продувкой образца, находящегося в графитовом тигле газом CO.

Содержание элементов во всех пробах представлено в табл. 4.

Таблица 4. Химический состав проб эксперимента № 2

Элемент	Расплав	Шлак	Металл
Al, %	3,16	3,91	0,16
Ca, %	1,40	1,68	0,11
Co, %	0,090	0,0052	0,60
Cr, %	0,33	0,55	0,094
Cu, %	0,0063	0,001	0,012
Fe, %	21,3	11,9	83,8
Mg, %	6,97	8,58	0,36
Mn, %	0,48	0,56	0,045
Ni, %	1,1	0,029	6,31
P, %	0,010	0,0042	0,034
Ti, %	0,051	0,056	0,0082
Zn, %	0,018	0,003	0,003
SiO_2, (Si), %	36,6	46,2	(1,03)
C,%	0,005	1,45	4,06
S, %	0,005	0,0068	0,0041

За время эксперимента было отобрано 9 проб. Большинство проб по своему составу походило на шлаковую фазу, поэтому было принято решение изобразить их на одном графике (Рис. 2, 3) со шлаком. Таким образом, можно считать точку, соответствующую пробе № 8 содержанием элемента в шлаке имитируемой плавки.

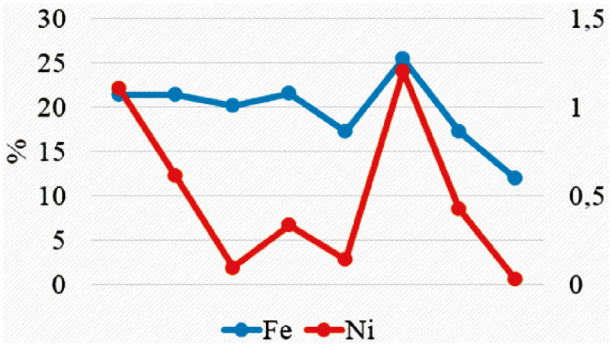


Рис. 2. Fe и Ni* в шлаке

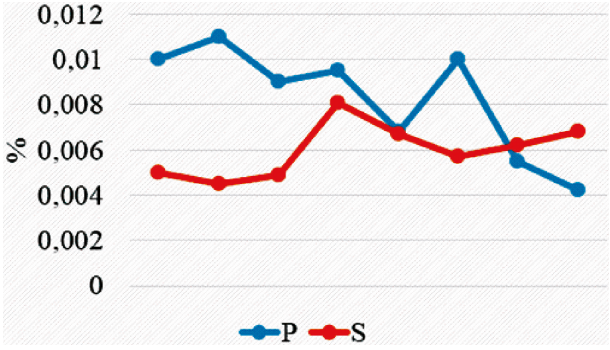


Рис. 3. S и P в шлаке

*показатели для Ni показаны на вспомогательной оси справа

На 6 пробе отчетливо виден скачок содержания некоторых элементов, что может говорить о неоднородности образца и о том, что частицы металла могли внести вклад в изменение некоторых показателей.

Сравнивая расчетные данные с опытными можно говорить о высокой степени совпадения значений, а в случае с никелем наблюдается картина, превзошедшая расчетные ожидания.

Из приведенных в работе таблиц следует, что общее содержание серы в металле значительно меньше чем в руде — в 14,8 раз. Содержание в шлаке — также мало и отличается от содержания в металле всего в 1,7. Это можно объяснить тем, что плавка велась без флюса и сера, вступив в реакцию с кислородом удалялась сразу же в газовую фазу. Содержание фосфора в металле увеличилось по сравнению с показателями в руде. Это объясняется тем, что условия восстановительной плавки не предрасполагают к удалению фосфора, и он, восстановившись из оксида, перешел в металл. По этой же схеме произошло восстановление оксидов, других элементов, таких как Fe и Ni. В результате чего из руды с содержанием железа 30,68% получили металл с 83,8%, а содержание никеля выросло с 1,45% до 6,31%.

В конечном итоге получился металл, химический состав которого схож с черновым ферроникелем, который на предприятиях переделывают в ферроникель различных марок, и удовлетворяет условиям для его дальнейшего передела в конвертерной печи. Окислительная плавка необходима для обезуглероживания, повышения доли никеля в металле и удаления вредных примесей (главным образом фосфора).

Таким образом результаты этих экспериментов позволяют считать технологию переработки окисленных никелевых руд в печах барботажного типа жизнеспособной и подтверждает достоверность результатов расчетов параметров плавки в барботажной печи с применением латеритовых руд.

По данной теме зарегистрировано 3 ноу-хау по темам переработки конвертерного шлака и подготовки руды к плавке № 22-001-2014, № 23-001-2014, № 23-001-2014.

Список литературы

1. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа: учебник для вузов — М.: «Академкнига», 2007. — 466 с. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. Metallurgiya zheleza: uchebnik dlya vuzov — M.: «Akademkniga», 2007. — 466 p.
2. Chatterjee A. Hot metal production by smelting reduction oxide. — Нью-Дели, Индия, 2010. — 240 с.
3. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н, Похвиснев А.Н. Металлургия чугуна: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. / Под редакцией Ю.С. Юсфина — М.: «Академкнига», 2004. — 774 с. Vegman E.F., Zherebin B.N, Pokhvisnev A.N. Metallurgiya chuguna: Uchebnik dlya vuzov. 3-e izd., pererab. i dop. / Pod redaktsiei Yu.S. Yusfina — M.: «Akademkniga», 2004. — 774 p.
4. Казачков Е.А. Расчеты по теории металлургических процессов — М.: «Академкнига», 1988. — 288 с. Kazachkov E.A. Raschety po teorii metallurgicheskikh protsessov — M.: «Akademkniga», 1988. — 288 p.
5. Смирнов В.И. Рудные месторождения СССР, Том 2 — М.: «Недра», 1978. — 399 с. Smirnov V.I. Rudnye mestorozhdeniya SSSR, Tom 2 — M.: «Nedra», 1978. — 399 p.

К.И. Смирнов, В.Е. Рощин, Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск

РАЗДЕЛЕНИЕ ИЛЬМЕНИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА НА ЖЕЛЕЗО И ДИОКСИД ТИТАНА ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Проведены лабораторные эксперименты по восстановлению железа из ильменитового концентрата и последующему жидкофазному разделению с получением концентрата оксидов титана и первородного железа. Исследованы особенности восстановления железа из кристаллической решетки ильменита, а также жидкофазного разделения материала, подвергнутого восстановительному обжигу, на концентрат оксидов титана и первородное железо.

Введение. Ильменитовые руды, основным минералом которых является ильменит $FeO{\cdot}TiO_2$, обогащают методом магнитной сепарации. В результате получают концентрат с содержанием оксидов железа до 50% и 45–55% оксидов титана, при этом содержание пустой породы в концентратах не превышает 5% [1]. Вследствие высокого содержания оксидов железа в концентрате переработка гидрометаллургическим методом с целью получения высокотитанистого продукта нежелательна, так как при этом в виде побочных продуктов образуются соли железа и ванадия, которые пользуются малым спросом [2, 3]. Присутствие в концентрате диоксида титана в большом количестве не позволяет использовать и классическую схему производства чугуна. Ильменитовый концентрат можно использовать в классической схеме только в виде добавки к шихте в доменную печь, при этом содержание диоксида титана в шлаке не должно превышать 8% [4]. Таким образом, существующие схемы переработки ильменитовых концентратов, непригодны для комплексной переработки с извлечением всех полезных компонентов. При использовании способа пирометаллургического обогащения приходится добавлять флюсующие материалы для снижения температуры плавления получаемого шлака, что существенно снижает концентрацию TiO_2 в шлаке [5].

Переработка такого материала может быть основана на технологиях, позволяющих извлекать все полезные компоненты руды без добавления флюсующих материалов.

Целью данной работы является исследование возможности переработки ильменитовых концентратов с получением первородного железа и общего концентрата оксидов титана и ванадия без добавления флюсующих материалов.

Методика проведения экспериментов. В качестве материала для проведения экспериментов использовали ильменитовый концентрат, состав которого приведен в табл. 1. Эксперименты проводили в 2 этапа. Первый этап заключался в твердофазном восстановлении железа в кристаллической решетке ильменитового концентрата. В рабочее пространство печи сопротивления фирмы Nabertherm устанавливали графитовый тигель с шихтой. В тигель помещали ильменитовый концентрат в виде частиц размером < 0,4 мм и восстановитель с избытком, в качестве которого использовали шубаркульский энергетический уголь, сверху насыпали дополнительный уголь, чтобы предотвратить попадание кислорода. Печь нагревали до 1200, 1300 и 1400 °С и выдерживали в течение 120 минут. После выдержки печь отключали, образцы охлаждали вместе с печью до комнатной температуры. Полученный материал подвергали магнитной сепарации для отделения золы угля. Полученные образцы заливали эпоксидной смолой, шлифовали и исследовали на оптическом и электронном микроскопах. Химический состав фаз определяли микрорентгеноспектральным методом на микроскопе JSM-6460LV фирмы JEOL.

Таблица 1. Состав концентрата (масс. %).

Компонент	TiO_2	Fe_2O_3	FeO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	V_2O_5
Содержание	45,0 ... 47,0	14,0 ...18,0	33,0 ... 36,0	0.600	< 01,00	< 0,030	< 0,300
Среднее	46,20	16,45	34,20	0,420	0,890	0,015	0,240

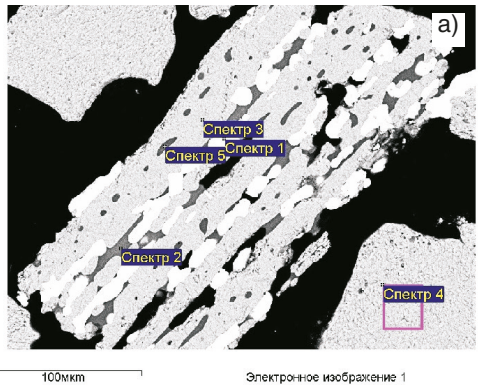
Второй этап заключался в разделении плавлением предварительно восстановленного ильменитового концентрата на первородное железо и суммарный концентрат оксидов титана и ванадия. В рабочее пространство печи сопротивления фирмы Nabertherm устанавливали корундовый тигель с шихтой. В тигель помещали предварительно восстановленный ильменитовый концентрат, подвергнутый магнитной сепарации. Печь нагревали до температуры 1550 °С и в течении часа температуру повышали до 1650 °С. В процессе нагрева от 1550 до 1650 °С намораживанием на нагретый стальной прут отбирали пробы шлака. Далее печь выключали и металл охлаждали вместе с печью до комнатной температуры. После этого тигель извлекали из печи и доставали металл. Полученные образцы шлака и металла заливали эпоксидной смолой, шлифовали и исследовали на оптическом и электронном микроскопах. Химический состав фаз определяли микрорентгеноспектральным методом на микроскопе JSM-6460LV фирмы JEOL.

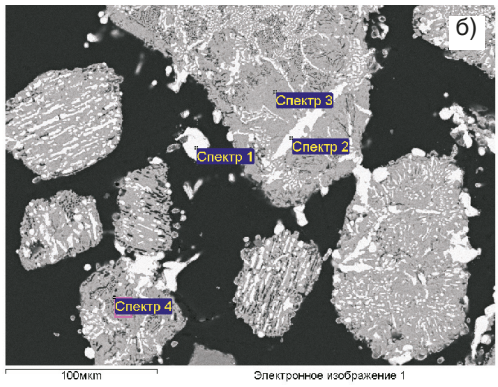
Результаты экспериментов. При восстановлении железа из ильменитового концентрата наблюдали выделение металлической фазы как на поверхности кусков ильменита, так и внутри них (рис. 1). С повышением температуры остаточное содержание оксидов железа уменьшается (рис. 1 а, б). При достижении температуры 1400 °С начинается интенсивное восстановление титана, причем практически весь титан науглероживается с образованием карбидов (рис. 1 в). На всей площади сечения образцов, остатков золы угля не обнаружено, что исключает возможность разбавления оксидной фазы.

При разделении материала, полученного при температуре 1200 °С, образовался слиток чистого высокоуглеродистого первородного железа (рис. 2 а) и шлак, в котором наблюдаются металлические включения (рис. 2 б). В шлаке наблюдаются 3 фазы: оксиды титана, ильменит новой генерации в виде дендритов и силикатная фаза заполняющая междендритное пространство. Появление алюминия в шлаке обусловлено растворением глинозема корундового тигля.

При разделении материала, полученного при 1300 °С, в шлаковой фазе произошла коагуляция металлических включений, но отделения металлической фазы не произошло (рис. 2 в). При этом в метал-

лической фазе титан не обнаруживается. Наблюдаются 2 оксидные фазы: оксиды титана и ильменит новой генерации. В оксидной фазе обнаруживается некоторое количество алюминия, перешедшего из тигля.





Спектр	O	Al	Si	Ca	Ti	V	Fe
Спектр 1					1.6		92.6
Спектр 2	68.5	3.5	19.1	2.8	2.0	0.02	3.9
Спектр 3	65.4	0.1			1.9	0.34	15.0
Спектр 4	65.3	0.1			18.5	0.22	15.7
Спектр 5	69.8	3.7	20.1	2.4	1.8	0.01	2.0

Спектр	O	Si	Ti	V	Mn	Fe
Спектр 1			1.5			98.5
Спектр 2			2.2			97.8
Спектр 3	66.4		29.3	0.4	0.5	3.2
Спектр 4	65.2	0.1	29.5	0.2	1.0	4.0

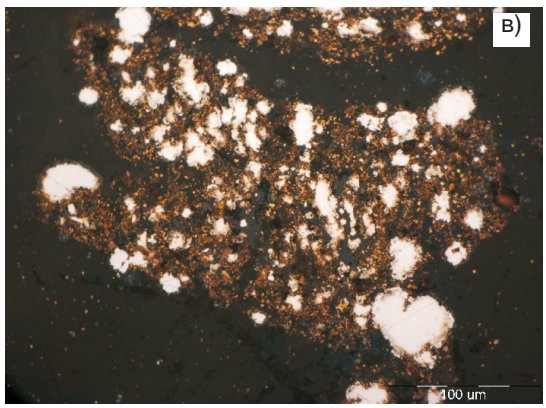
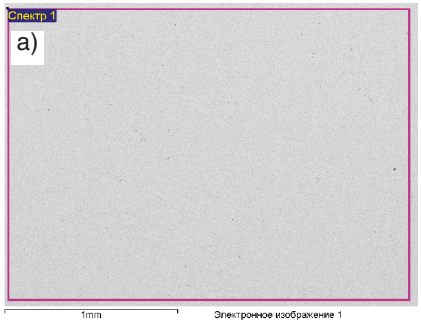


Рис. 1. Вид и состав фаз ильменитового концентрата подвергнутого восстановительному обжигу ат.%:
а — при 1200 °С; б — при 1300 °С; в — при 1400 °С

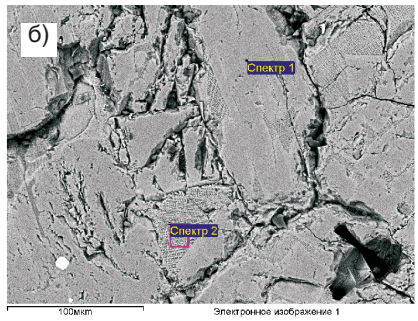
Материал, в котором образовались карбиды титана, расплавить не удалось вследствие высокой температуры плавления.

Обсуждения результатов. Большое влияние на процесс восстановления железа оказывает температура и время выдержки. При температуре 1200 °С и выдержке 120 минут в оксидной фазе остается порядка 15 ат.% железа, а при 1300 °С и той же выдержке его содержание снижается до 3–4 ат.%. Повышение температуры выше 1400 °С нецелесообразно, так как это ведет к образованию карбидов титана, что нежелательно вследствие высокой температуры плавления.

Процесс разделения металлической и оксидной фазы зависит от результатов предшествующего восстановительного обжига. Во время разделения невозможно проводить процесс довосстановления железа из оксидной фазы без восстановления титана и образования его карбидов. Следовательно, для получения шлака с высоким содержанием оксидов титана требуется более полное твердофазное восстановление железа. Также требуется исключить попадание посторонних оксидов (золы угля или огнеупорного материала).



Спектр	C	Fe
Спектр 1	28.5	71.5



Спектр	O	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe
Спектр 1	65.6	7.7			24.5		1.6
Спектр 2	63.0	8.6	8.4	2.5	5.8	1.6	10.1

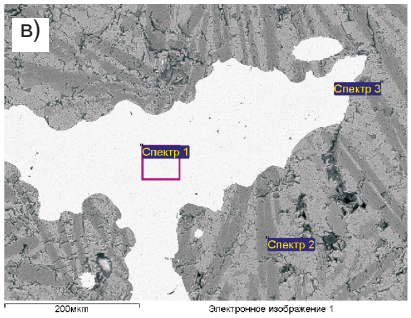


Рис. 2. Вид и состав фаз продуктов разделения ильменитового концентрата подвергнутого восстановительному обжигу при 1200 °С (а, б) и 1300 °С (в), ат.%: а — металл; б — шлак; в — шлак

Спектр	C	O	Al	Ti	V	Mn	Fe
Спектр 1	21.3						78.6
Спектр 2		65.0	6.4	22.5	0.2	0.1	5.6
Спектр 3		63.1	6.3	10.6	0.1	0.4	19.3

ВЫВОДЫ

В лабораторных условиях опробован процесс твердофазного восстановления железа из ильменитового концентрата с сохранением титана и ванадия в оксидной фазе.

Разделительной плавкой без добавления шлакообразующих и флюсующих компонентов удается получить чистое первородное железо и общий концентрат оксидов титана и ванадия.

Список литературы

1. Леонтьев, Л.И. Пирометаллургическая переработка комплексных руд/ Л.И. Леонтьев, Н. А. Ватолин, С.Л. Шаврин, Н.С. Шумаков. — М.: Металлургия, 1997. — 432 с.
2. Гудима Н. В.. Шейн Я. П. Краткий справочник по металлургии цветных металлов. — М.: Металлургия. 1975. — 536 с.
3. Уткин Н. И. Производство цветных металлов. — М.: Интермет Инжиниринг. 2004. — 442 с.
4. Резниченко, В.А. Титаномагнетиты. Месторождения, металлургия, химическая технология / В.А. Резниченко, В.И. Шабалин. — М: Наука, 1986. — 294 с.
5. Гудим, Ю.А. Возможности пирометаллургиче-ского обогащения ильменитовых концентратов / Ю.А. Гудим, М. Акнурланулы, В.Е. Рощин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». — 2016. — Т. 16, № 1. — С. 23–32.
6. Рощин В.Е. Селективное восстановление металлов в решетке комплексных оксидов / В.Е. Рощин, А.В. Рощин // Металлы. — 2013. — № 2. — С. 12–20.
7. Рощин В.Е. Возможности двухстадийной переработки концентратов титаномагнетитовых руд / Рощин В.Е., Асанов А.В., Рощин А.В. // Электрометаллургия. 2010, № 6. — С. 15–25.

В.Е. Рощин,
Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ КОМПЛЕКСНЫХ РУД С ПОЛУЧЕНИЕМ ПЕРВОРОДНОГО ЖЕЛЕЗА И ОКСИДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ТИТАНА И МАГНИЯ

Современные технологии и агрегаты для извлечения железа из руд ориентированы на переработку богатых монометальных руд. Однако в регионах с длительно развивавшимся металлургическим производством, например на Южном Урале, запасы таких руд либо уже исчерпаны, либо близки к этому. Вовлечение же в переработку бедных и комплексных руд, имеющиеся запасы которых способны обеспечить устойчивую работу металлургического комплекса на протяжении многих десятилетий, требует значительных затрат на их подготовку. Но даже после сложной подготовки использование в доменных печах, например сидеритовых руд, можно только в ограниченных количествах в качестве добавок к традиционному сырью.

В комплексных титаномагнетитовых рудах помимо железа присутствуют ещё титан и ванадий. В РФ на долю титаномагнетитовых руд приходится 48% запасов титана и 92% ванадия, в мире эти запасы составляют 60% и 90% соответственно. Эффективной может быть только такая технология переработки комплексных руд, которая позволяла бы полностью извлекать из них все ценные металлы. Однако переработка их существующими технологиями невозможна вследствие образования при доменной плавке карбидов титана и формирования тугоплавких доменных шлаков. Исключение составляют лишь качканарские титаномагнетиты, в которых титан содержится в малых количествах. Из них на Нижне-Тагильском металлургическом комбинате доменным процессом извлекают железо и ванадий, однако при этом с доменным шлаком, в котором содержится ~10% TiO_2, теряется весь титан. Разбавление ценных компонентов для снижения температуры плавления шлаков и полная их потеря предполагается и в широко рекламируемом процессе ITmk3, который авторы [1] предлагают исполь-

зовать для получения гранулированного чугуна из смеси титаномагнетитовых и сидеритовых руд. Очевидно, что для селективного извлечения из комплексных руд железа, титана, ванадия, магния и других ценных металлов нужны технологии, основанные на новых научных принципах.

На основе представлений химии и физики твёрдого тела о несовершенных кристаллах, квантовой механики об особенностях распределения и перемещения электронов в металлах и ионных полупроводниках нами разработаны новые принципы твёрдофазного селективного восстановления металлов в кристаллической решётке оксидов [2–7] и базирующиеся на этих принципах основы безотходной технологии переработки кусковых комплексных руд [8–14] и техногенных отходов [15, 16].

Разрабатываемая концепция теории охватывает все известные результаты восстановления с образованием металла на поверхности кусков богатых моноруд, выделение металла внутри комплексных и бедных руд, образование и испарение субоксидов. Её основные положения сводятся к следующему:

1. В руде, как в любой конденсированной фазе, нет отдельных молекул, поэтому восстановитель всегда взаимодействует не с молекулой оксида, а с ионами кристаллической решётки оксида. Суть восстановления сводится к перераспределению внутри оксида валентных электронов между катионами металла и ионами кислорода (рис. 1), при этом роль восстановителя в элементарном акте восстановления заключается в извлечении на поверхности оксида атома кислорода с образованием в решётке оксида анионной вакансии и двух «лишних» электронов (рис. 2а).

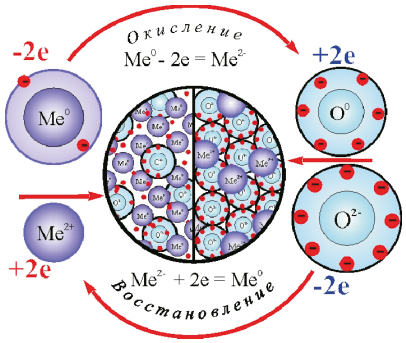


Рис. 1. Перераспределение электронов при окислении и восстановлении металла

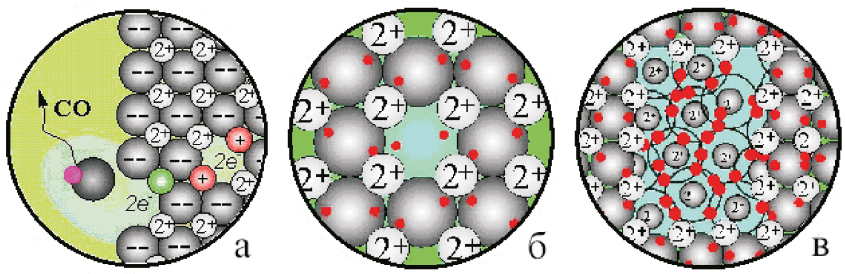


Рис. 2. Последовательность появления анионной вакансии (а), металлической связи в вакансии (б) и металлической фазы (в) при извлечении анионов кислорода из кристаллической решётки оксида

2. Образование металлической фазы происходит, минуя этап образования атомов. «Лишние» электроны анионных вакансий обобществляются в вакансии ближайшими катионами, не образуя устойчивой связи ни с одним из них (рис. 2б). Обобществление электронов катионами является критерием образования металлической связи, следовательно, в анионной вакансии между катионами сразу возникает металлическая связь, а по мере слияния вакансий и накопления «лишних» электронов происходит постепенная трансформация оксидной кристаллической решётки в металлическую (рис. 2в). Выделение металлической фазы может происходить внутри оксидной вдали от поверхности реагирования восстановителя с оксидом (рис. 3).

3.В восстановительных условиях, когда исключено поступления атомов кислорода извне, «лишние» электроны вакансии не могут быть связаны анионами. Поэтому заряженная двумя электронами анионная вакансия не может исчезнуть, растворившись в оксиде, и даже одиночная заряженная вакансия является термодинамически устойчивым металлическим зародышем.

4. Вследствие развитого при температуре пирометаллургических процессов теплового движения ионов заряженные вакансии рассеиваются в объёме оксида со скоростью, существенно превышающей скорость диффузии ионов. В зависимости от соотношения скорости образования и скорости рассеивания слияние вакансий и выделение металла могут происходить как на поверхности (обычно наблюдаемый случай при восстановлении металлов из богатых монорудов), так и в объёме (характерно для комплексных руд) оксида (рис. 4).

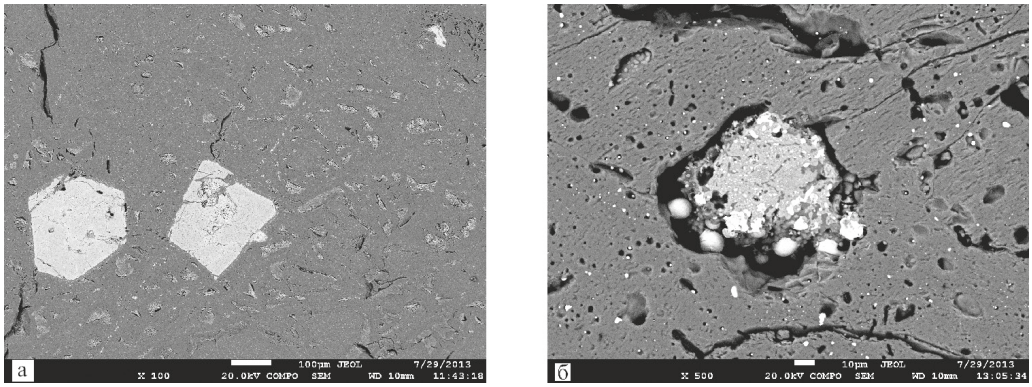


Рис. 3. Выделение металлической фазы в кристаллах хромшпинелида, вкрапленных в горную породу дунит: а – исходные кристаллы в породе, б — выделения в частично восстановленном кристалле

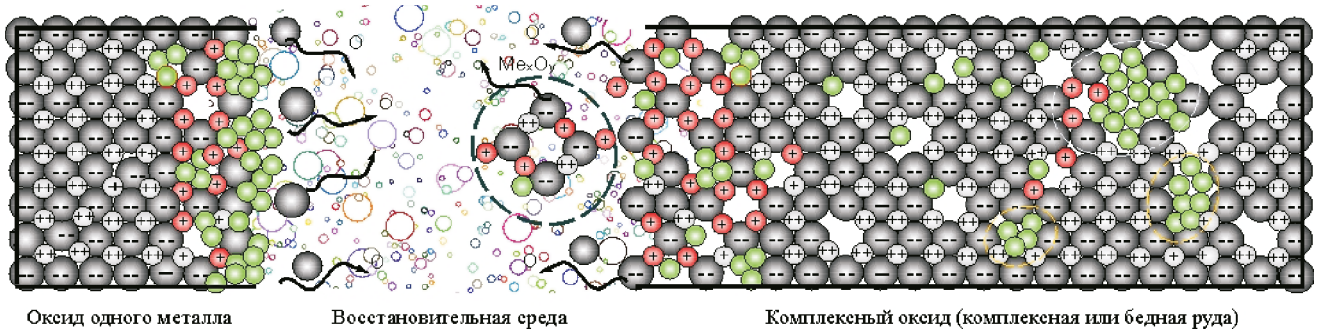


Рис. 4. Схема возможных вариантов выделения металлической фазы при восстановлении

5. В случае восстановления многозарядных катионов ($Me^{3+...6+}$) поверхность оксида может насыщаться вакансиями и от неё может происходить отрыв фрагментов кристаллической решётки, соответствующих низшим оксидам (рис. 5). В последнем случае наблюдается повышенная сублимация оксидов, характерная для оксидов алюминия, кремния, ванадия, молибдена и других многовалентных металлов.

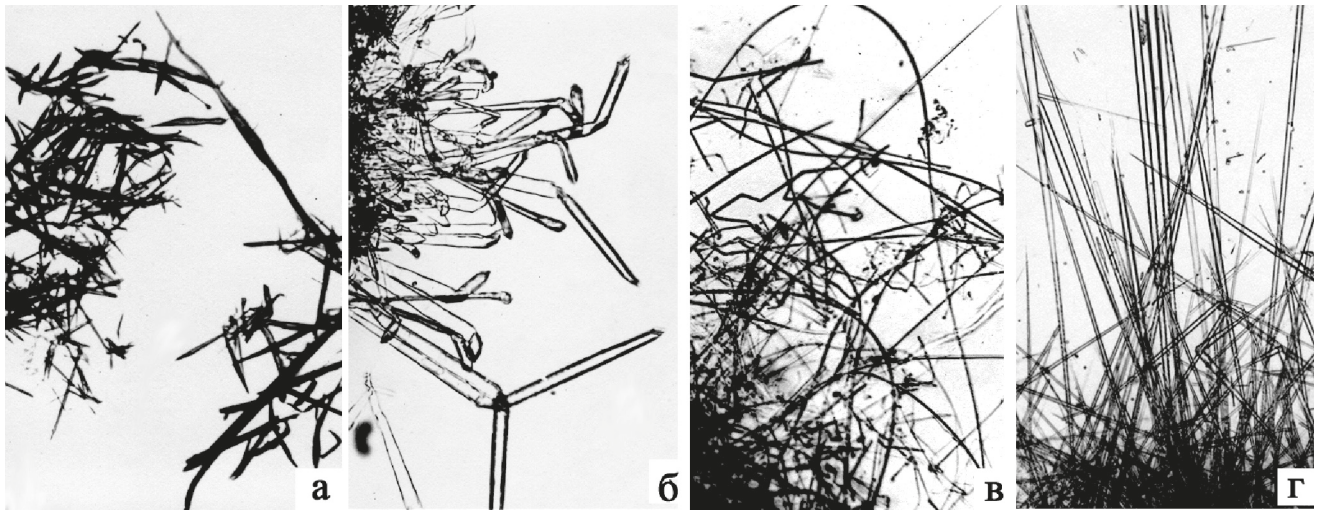


Рис. 5. Кристаллы низших оксидов алюминия $Al_2O_{(3-x)}$ (а), Al_3O_4 (б), AlO (в) и Al_2O (г) в конденсате продуктов карботермического восстановления алюминия из глинозёма

6. На начальном этапе образования металлической фазы носителем её свойств являются заряженные электронами анионные вакансии — дефекты кристаллической решётки материнской (оксидной) фазы. Поэтому на начальном этапе вклад межфазной энергии ΔG_F в изменении энергии Гиббса ($\Delta G_\Sigma = \Delta G_V + \Delta G_F + \Delta G_{деф.}$) равен нулю. Поверхность раздела между материнской оксидной и новой металлической фазой формируется при уже относительно большом размере зародыша, когда отрицательная величина объёмного слагаемого (ΔG_V) изменения энергии Гиббса существенно превышает положительный вклад (ΔG_F) межфазной энергии. Поэтому зарождение металлической фазы не требует обычно наблюдаемого в подобных процессах пересыщения (переохлаждения) материнской фазы компонентом зарождающейся фазы, а зародыш не имеет критического размера. В связи с этим размеры частиц и распределение металлической фазы определяются концентрацией восстанавливаемого металла в оксидных фазах. При малой концентрации восстанавливаемого металла в оксиде образуются наноразмерные металлические частицы (рис. 6а).

7. Формирование металлической фазы происходит в наноразмерной пустоте сливающихся вакансий. Поэтому рост новой фазы не испытывает сопротивления и со стороны решётки материнской фазы ($\Delta G_{деф.}$), то есть вклад деформации кристаллической решётки в изменение энергии Гиббса системы также равен нулю. Вследствие этого форма выделяющейся металлической фазы определяется исключительно условиями питания зародыша. Благодаря этому внутри твёрдой оксидной фазы можно выращивать идиоморфные кристаллы металла (рис. 6б), которые получают только конденсацией паров из газовой фазы или из разбавленных растворов.

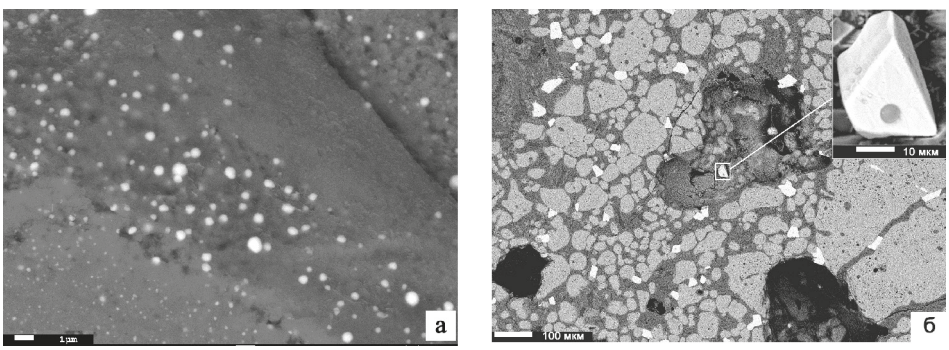


Рис. 6. Размеры и распределение частиц железа в форстерите и энстатите дунита (а) и идиоморфные кристаллы железа в титаномагнетитовой руде (б)

8. Перестройкой катионов оксидной решётки в металлическую завершается восстановление любых металлов в любых оксидах и рудах любым восстановителем. Поэтому изложенные закономерности процесса являются основой общей для всех металлов теории восстановления.

Изложенные положения теории базируются на результатах восстановления металлов в чистых оксидах (кремния, алюминия) и богатых (типа магнетита) рудах, селективного восстановления в комплексных и бедных рудах (титаномагнетитовых, ильменитовых, хромитовых, сидеритовых), а также в нерудных минералах (дунитах, форстерите, энстатите) и в техногенных отходах (красных шламах, шлаках медеплавильного и никелевого производств). Такой обмен электронами возможен без плавления руды и тотального удаления из неё кислорода, как это предполагается современной теорией восстановления. При этом восстановление металла и выделение металлической фазы происходят с достаточно большой скоростью даже внутри кусков руды в окружении ионов кислорода без непосредственного контакта металла с восстановителем и без плавления руды и металла.

Твёрдофазное восстановление успешно реализуется также при использовании низкокачественного энергетического угля в качестве восстановителя и при относительно низкой (900...1200°С) температуре. А поскольку выделение металла происходит внутри оксидной фазы без контакта с углеродом, то металл не растворяет углерод и не загрязняется примесями из восстановителя, атмосферы или футеровки агрегата. В результате такого процесса получается металло-оксидный композит, содержащий

чистое первородное железо и неразбавленный шлакообразующими добавками концентрат оксидов второго компонента комплексной руды — оксида титана, магния и других (рис. 7).

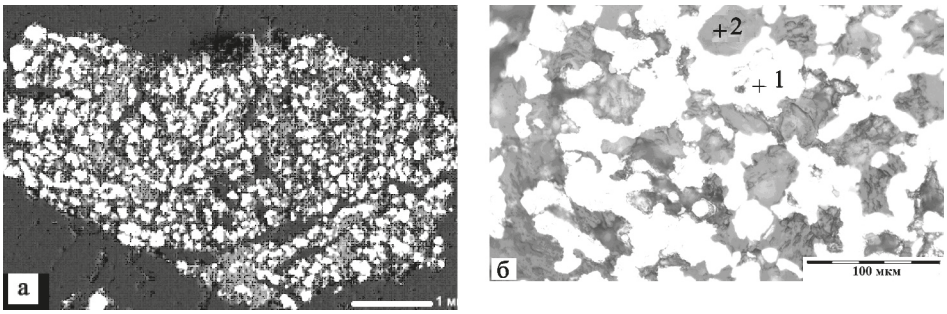


Рис. 7. Металло-оксидный композит Fe–MgO, полученный из сидеритовой руды. Состав фаз в точках, ат. %: 1 — 100,00 Fe; 2 — 44.59 Mg, 37,66 O, 6,20 Fe, 11,54 Mn

Комплексные руды можно подвергать металлизации в кусковом виде, при этом целесообразно использовать кусочки руды размером 10...20 мм. Поскольку оксидная фаза в металло-оксидном композите, получаемом при восстановлении железа из сидеритовой и ильменитовой руд, представлена в основном тугоплавкими оксидами магния и титана, то расплавить такие композиты весьма затруднительно. Однако при непрерывной загрузке в электропечь сыпучего композиционного материала он легко растворяется в шлаке, металл в виде капель оседает в металлическую ванну, а тугоплавкие оксиды накапливаются в шлаке, что вызывает его «сворачивание» (рис. 8).

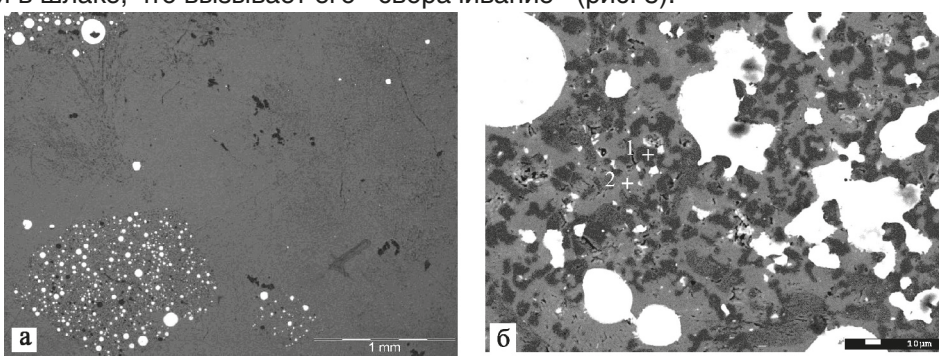


Рис. 8. Растворение металло-оксидного композита Fe–MgO в шлаке (а) и состав оксидных фаз в объёме растворяющегося композита (б), % масс: 1 — 80,08 MgO; 0,59 Al_2O_3; 0,22 SiO_2; 0,29 CaO; 7,84 MnO; 10,98 FeO; 2 — 25,74 MgO; 0,80 Al_2O_3; 37,57 SiO_2; 26,74 CaO; 5,79 MnO; 3,35 FeO

Такой шлак, содержащий до 80% MgO или до 90% TiO_2, необходимо принудительно удалять через рабочее окно. В результате для реализации технологического процесса переработки комплексных руд на сталь и оксидный концентрат второго металла наиболее целесообразным представляется технологический комплекс в составе восстановительного агрегата и дуговой сталеплавильной печи (рис. 9а). Один такой комплекс в состоянии производить 100...300 тыс. т стали в год. Стальной полупродукт на основе первородного железа далее целесообразно превращать в качественную стальную заготовку или продукты с высокой добавленной стоимостью — тонкую полосу, аморфную ленту, железный порошок для изготовления изделий сложной формы по технологии компьютерного прототипировая и т.д. Концентрат оксидов титана, получаемый из ильменитовых руд, можно использовать для производства диоксида титана, а концентрат (шлак) из титаномагнетитовых руд — для производства ферротитана.

Металло-магнезиальный композит, получаемый при переработке сидеритовых руд, в неразделённом виде может быть использован в качестве дополнительного шихтового материала в существующем производстве стали в кислородных конвертерах и дуговых сталеплавильных печах «большой» металлургии как источник первородного железа и заменитель магнезиального флюса, присаживаемого для увеличения стойкости футеровки (рис. 9б).

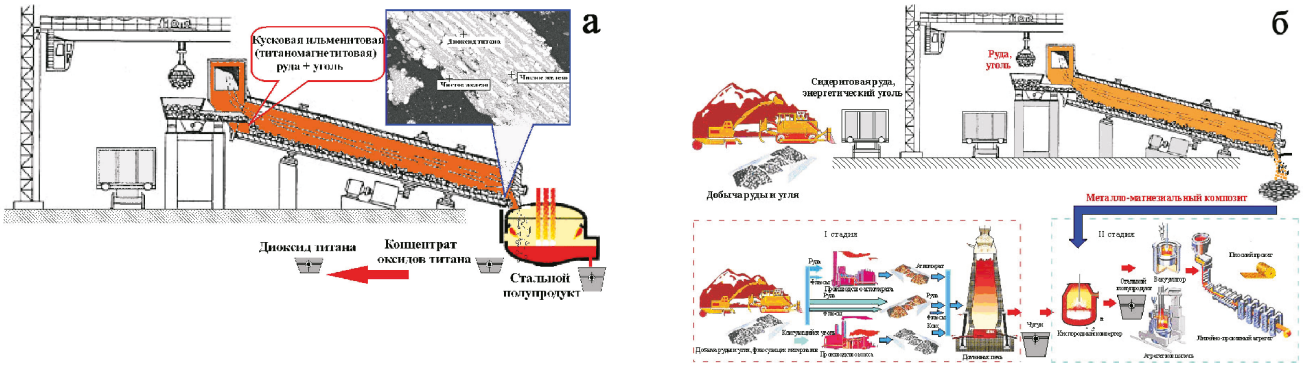


Рис. 9. Схема переработки ильменитовой руды в ДСП с получением стали и концентрата оксидов титана (а) и использования композита Fe–MgO в конвертере (б)

Таким образом, использованием предложенных вариантов технологии решается вопрос не только получения первородного железа из комплексных руд, но и их безотходной переработки с извлечением всех ценных компонентов.

Список литературы

1. Панишев Н.В., Рашников В.Ф., Дубровский Б.А., Редин Е.В. Металлизация шпатовых железняков и титаномагнетитов Челябинской области с получением гранулированного чугуна / Тезисы докладов участников восьмого промышленного форума «Реконструкция промышленных предприятий — прорывные технологии в металлургии и машиностроении». — Челябинск: Челябгипромез, 2016. — С. 48–49.
2. Рощин В.Е., Рощин А.В. Физические основы селективного восстановления металлов в кристаллической решётке комплексных оксидов // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. 2013 . № 5. — С. 44–54.
3. Рощин В.Е., Рощин А.В. Селективное восстановление металлов в решётке комплексных оксидов // Металлы. 2013, № 2. — С. 12–20.
4. Рощин В.Е., Рощин А.В. Физика химических реакций окисления и восстановления металлов в твердой фазе // Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2013): труды международной научно-технической конференции. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2013. — С. 225–231.
5. Рощин В.Е., Рощин А.В. Физика процессов окисления и восстановления металлов в твердой фазе // Металлы. 2015, № 3. — С. 19–25.
6. Рощин В.Е., Рощин А.В. Развитие теории восстановления металлов. Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XVI Международной конференции: в 2 ч. // под ред. В.Е. Рощина. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. — Ч. 1. — С. 26–35.
7. Рощин В.Е., Рощин А.В. Развитие теории карботермического восстановления и высокотемпературного окисления железа в кристаллической решётке оксидов // Металлургия: технологии, инновации, качество. Под общей редакцией Е.В. Протопопова. Новокузнецк: 2015. С. 155–160.
8. Асанов А.В., Рощин В.Е., Рощин А.В. Твердофазная металлизация железо-ванадиевых концентратов и жидкофазное разделение продуктов их восстановления / Металлы, № 6, 2010. — С. 35–38.
9. Рощин В.Е., Асанов А.В., Рощин А.В. Возможности двухстадийной переработки концентратов титаномагнетитовых руд // Электрометаллургия, № 6, 2010. — С. 15–25.
10. Рощин В.Е., Рощин А.В. Южно-Уральские титаномагнетиты как источник первородного железа для сталеплавильной и диоксида титана для титановой промышленности //Сборник трудов XIII Конгресса сталеплавильщиков. — Екатеринбург: ООО «Эзапринт». 2014. — С. 467–471.

11. Рощин В.Е., Рощин А.В. Основы селективного восстановления железа в титаномагнетитах с получением концентрата оксидов титана. Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР. Труды научно-практической конференции, Екатеринбург: Изд. Уральский рабочий. 2015 — С. 68–73.
12. Брындин С.А., Рощин А.В., Черепанов Д.А. Растворение металлофлюса в шлаковом расплаве / Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XV Международной научной конференции: в 2 ч. // под ред. В.Е. Рощина. — Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2013. Ч. 2. — С. 45–48.
13. Рощин В. Е, Брындин С. А., Салихов С. П., Рощин А. В. Технология и оборудование для прямой комплексной переработки кусковой сидеритовой руды при производстве стали // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2016, № 1. — С. 22–28.
14. Рощин В. Е., Салихов С. П., Рощин А. В., Брындин С. А. Получение ожелезненного магнезиального флюса и первородного железа путём металлизации кусковой сидеритовой руды // Новые огнеупоры. 2016, № 3. — С. 24–25.
15. Рощин В.Е., Рощин А.В. Теория селективного твёрдофазного восстановления — научная основа для создания технологий переработки железосодержащих техногенных отходов. Труды Конгресса с международным участием и элементами школы молодых учёных «Фундаментальные исследования и экспериментальные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований». Екатеринбург, УрО РАН, 2014.
16. Потапов К.О., Поволоцкий В.Д., Рощин В.Е. Пирометаллургическое извлечение железа из отходов медеплавильного производства // Труды Конгресса с международным участием и элементами школы молодых учёных «Фундаментальные исследования и экспериментальные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований». Екатеринбург, УрО РАН, 2014. С. 544–548.

Л.Н. Шевелев, ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Черная металлургия России относится к числу наиболее энергоемких отраслей промышленности. На ее долю приходится свыше 60% выбросов CO_2 в промышленности (без учета отражения в промышленности выбросов CO_2 от предприятий топливо-энергетического комплекса).

За период 1990–2014 гг. в черной металлургии России проведена масштабная реструктуризация неэффективных мощностей и структурная перестройка отрасли по способам производства и разливки стали. В частности, выведены из эксплуатации мартеновские печи и разливка стали в изложницы, они заменены конвертерами, электропечами, установками непрерывной разливки стали (МНЛЗ). В результате выбросы CO_2 в черной металлургии России снизились в 2014 г. по сравнению с 1990 г. на 35%. Это самый высокий показатель в мировой черной металлургии. Однако удельные показатели энергоемкости стали (удельные выбросы т CO_2/т стали) в России все еще уступают передовым развитым странам на 20–30%. Это свидетельствует о необходимости дальнейшего поиска резервов в сфере энергосбережения, в частности, перехода на прорывные энергосберегающие технологии.

На основе собственных исследований и обобщения научных трудов [1–5] выдающихся российских и зарубежных ученых-доменщиков (Рамм А.Н., Юсфин Ю.С. Воскобойников В.Г., Гохман Ю.И., Жураковский Б.А. и др.) «ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» определил, что наибольший энергетический потенциал снижения выбросов CO_2 в черной металлургии России находится в кокса-агло-доменном переделе (Рис. 1), а доля чугуна в энергоемкости стали составляет 65–80% (Рис. 2).

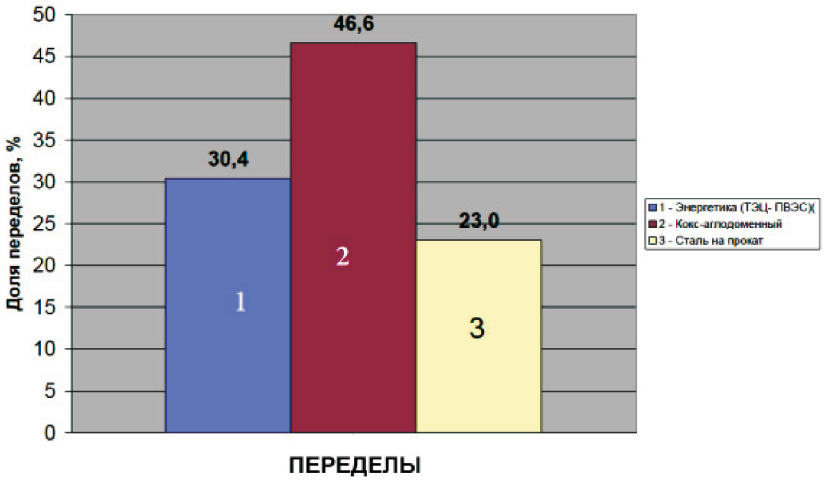


Рис. 1. Доля переделов в структура выбросов CO_2 на металлургических предприятиях с полным циклом производств

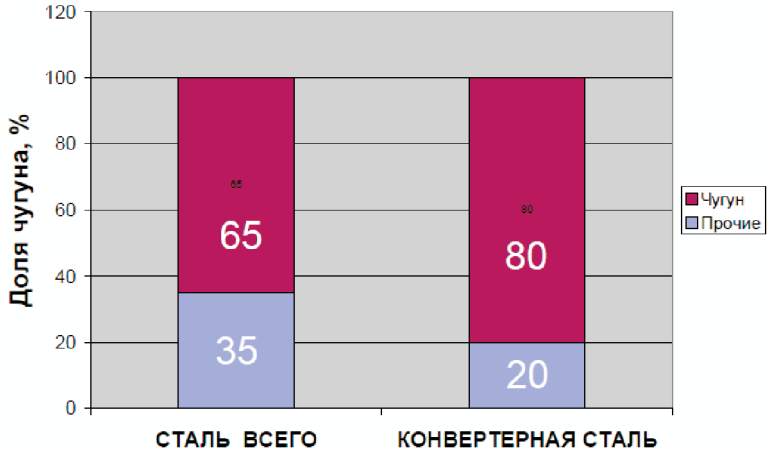


Рис. 2. Доля чугуна в структуре энергоемкости стали

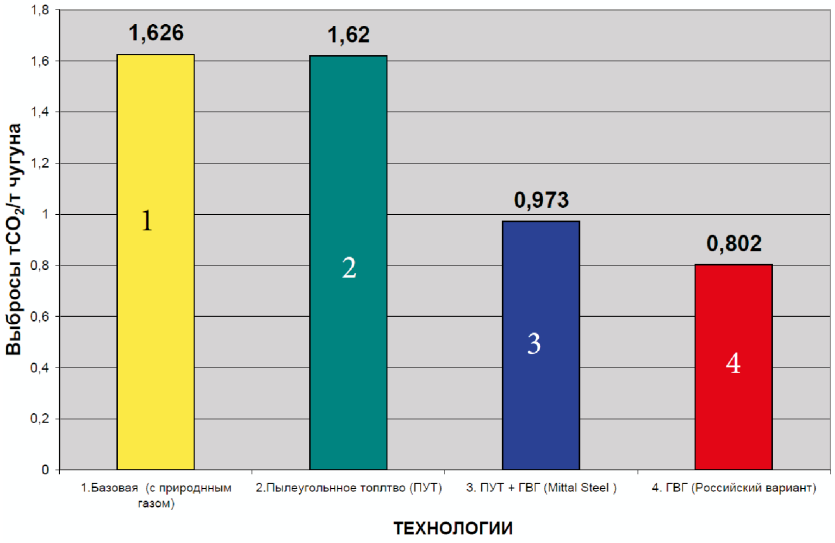


Рис. 3. Энергоемкость чугуна при различных технологиях его производства

В настоящее время в доменном переделе действуют и проектируются следующие энергосберегающие технологии: базовая технология (с природным газом); пылеугольное топливо (ПУТ); пылеугольное топливо, совмещенное с горячими восстановительными газами (ПУТ + ГВГ, опробованное фирмой «Миттал Стил» в Швеции (Лулеа) на экспериментальной доменной печи объемом 10 м^3); горячие восстановительные газы (ГВГ, Российский вариант).

По этим четырем энергосберегающим технологиям ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» выполнил оценку энергетической эффективности их реализации применительно к доменной печи № 2 ОАО «Тулачермет». Результаты этой оценки приведены на Рис. 3.

Оценка энергетической эффективности производства чугуна при различных энергосберегающих технологиях приведена в Табл. 1.

Наилучшие результаты имеет технология ГВГ. Она и принята в качестве приоритетной для черной металлургии России.

Технологическая схема реализации технологии ГВГ в условиях ОАО «Тулачермет» приведена на Рис. 4, 5.

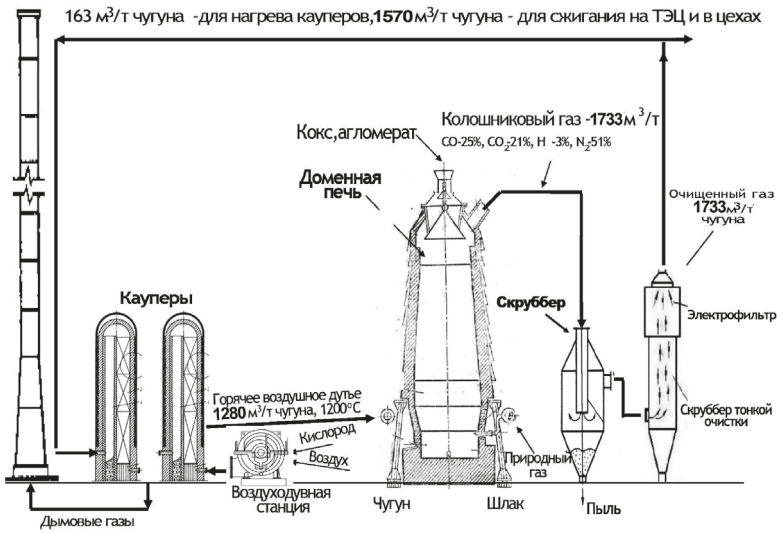


Рис. 4. Использование доменного газа в действующей технологии

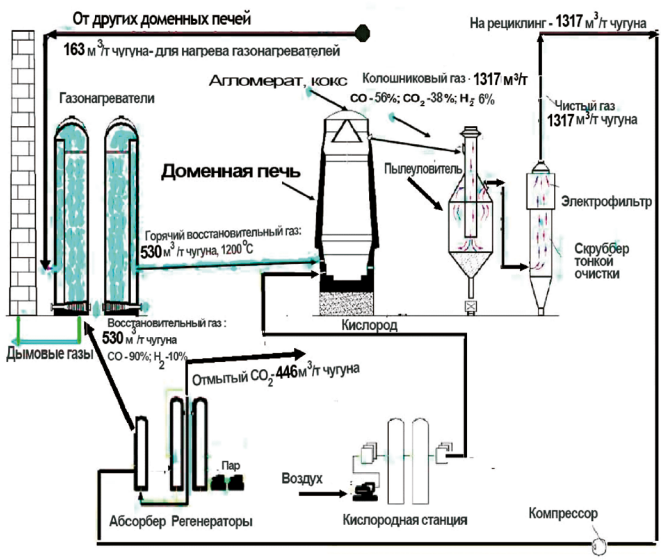


Рис. 5. Использование доменного газа в технологии ГВГ

Таблица №1. Оценка энергетической эффективности реализации различных энергосберегающих технологий в доменном производстве ОАО «Тулачермет»

№ п/п	Виды расходуемых материалов	Ед. измер.	К–ты эмиссии, т CO_2/ед.	Расход энергоресурсов, ед./т чугуна				Выбросы, т CO_2/т чугуна				Отклонение (+, –) тCO_2/т		
				Действующая технология	ПУТ	ПУТ + ГВГ	ГВГ	Действующая технология	ПУТ	ПУТ + ГВГ	ГВГ	ПУТ	ПУТ + ГВГ	ГВГ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
А.	Топливо в шихту													
1.	Скиповый кокс	т	3,103	0,455	0,379	0,249	0,290	1,412	1,176	0,773	0,900			
2.	Природный газ	1000 м³/т	1,835	0,060	–	–	–	0,110	–	–	–			
3.	ПУТ	т	1,484	–	0,180	0,180	–	–	0,267	0,267	–			
4.	ГВГ	1000 м³/т	0,954	–	–	0,466	0,530	–	–	0,446	0,506			
	Итого (А)	т CO_2/т						1,522	1,443	1,486	1,406	– 0,079	– 0,036	– 0,116
Б.	Побочные продукты (–)													
1.	Доменный газ	1000 м³/т	0,528	1,733	1,352	–	–	0,915	0,714	–	–			
2.	Отмытый газ (CO_2)	1000 м³/т	1,350	–	–	0,400	0,455	–	–	– 0,540	0,614			
3.	Восстановительный газ (CO)	1000 м³/т	0,954	–	–	0,466	0,530			0,446	0,506			
	Итого (Б)	т CO_2/т						– 0,915	– 0,714	– 0,986	– 1,120	– 0,201	+ 0,071	+ 0,205
	Итого (А — Б)	т CO_2/т						0,607	0,729	0,500	0,286	+ 0,122	– 0,107	– 0,321
В.	Замена доменного газа													
1.	Доменный газ	1000 м³/т	3,692	0,248	0,193	–	–	0,915	0,714	–				
2.	Конвертерный газ	1000 м³/т	1,336	–	0,055	0,084	0,084	–	0,073	0,112	0,112			
3.	Природный газ	1000 м³/т	1,590	–	–	0,164	0,164	–	–	0,261	0,261			
	Итого (В)	т CO_2/т		0,248	0,248	0,248	0,248	0,915	0,787	0,373	0,373	– 0,128	– 0,542	– 0,542
	Итого (А — Б + В)	т CO_2/т						1,522	1,516	0,873	0,659	– 0,006	– 0,649	– 0,863
Г.	Энергоресурсы													
1.	Кислород	1000 м³/т	0,628	0,030	0,030	0,090	0,090	0,019	0,019	0,057	0,057			
2.	Дутье	1000 м³/т	0,050	1,280	1,280	0,446	0,446	0,064	0,064	0,022	0,022			
3.	Теплоэнергия	Гкал	0,536	0,040	0,040	0,040	0,120	0,021	0,021	0,021	0,064			
	Итого (Г)	т CO_2/т						0,104	0,104	0,100	0,143	–	– 0,004	+ 0,039
	Итого выбросов (А–Б+В+Г)	т CO_2/т						1,626	1,620	0,973	0,802	– 0,006	– 0,653	– 0,824
	Снижение выбросов	%										– 3,7	– 40,2	– 50,7

В базовой технологии доменный газ как побочный продукт производства чугуна выполнял функцию низкокалорийного топлива и сжигался в различных металлургических агрегатах в смеси с коксовым или природным газом. С учетом реальной калорийности он оценивался примерно в 8 раз дешевле, чем природный газ и уменьшал себестоимость чугуна как побочный продукт. При реализации технологии ГВГ CO_2 отмывается из доменного газа, и он превращается в восстановительный газ. Кроме теплоносителя (примерно в два раза выше, чем доменный газ), он выполняет в технологии ГВГ важнейшую функцию газового восстановителя (CO). В результате резко снижается потребность в коксе, возрастают рудные нагрузки на кокс, увеличивается производительность доменной печи.

Изменение расхода кокса в условиях использования технологии ГВГ приведена на Рис. 6.

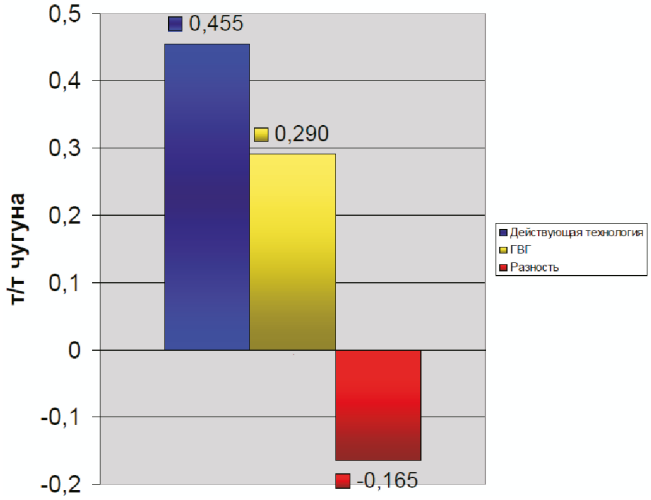


Рис. 6. Изменение расхода кокса

При использовании газового восстановителя (CO) увеличивается поверхность его контакта с окислами железа по сравнению с твердым окислителем (C) углерода кокса по формулам:

$$MeO + C = Me + CO, \quad (1)$$

$$MeO + CO = Me + CO_2. \quad (2)$$

При использовании газового восстановителя протекает одна реакция:

$$MeO + CO = Me + CO_2. \quad (3)$$

Происходит замена CO, полученного от кокса, готовым CO, внесенным восстановительным газом. В результате увеличивается скорость доставки «CO» до оксидов металла, возрастает его объем и площадь контакта, уменьшается потребность в твердом «C» кокса для образования CO.

Вместе с тем, исключение доменного газа как топлива приводит к необходимости его замены другими (альтернативными) видами газового топлива.

В качестве таких видов топлива для ОАО «Тулачермет» в условиях технологии ГВГ рекомендуются природный и конвертерные газы. В ОАО «Тулачермет» идет строительство конвертерного и прокатного цехов. В этом проекте предусмотрена система газоходов для отбора и использования конвертерного газа как попутного вторичного энергоресурса в качестве топлива с производством 0,080 т/т стали. Объем конвертерного газа заменит 0,084 ТУТ/т чугуна. При использовании доменного газа как топлива его расход в условном по предприятию в целом составлял: 1,733 м³/т х 0,143 = 0,248 ТУТ/т чугуна. Разница: 0,248–0,084 = 0,164 : 1,154 = 0,142 м³/т чугуна. В действующей технологии в составе «топливо в шихту» используется природный газ 0,060 м³/т чугуна (на других заводах около 100 м³/т). С переходом на технологию ГВГ общее потребление природного газа по предприятию в целом возрастает на: 0,142–0,060 = 0,082 м³/т чугуна. При этом затраты на расход условного топлива, а также выбросы CO_2 от него в связи с заменой доменного газа — сократятся (см. Рис. 7.1, 7.2, 7,3).

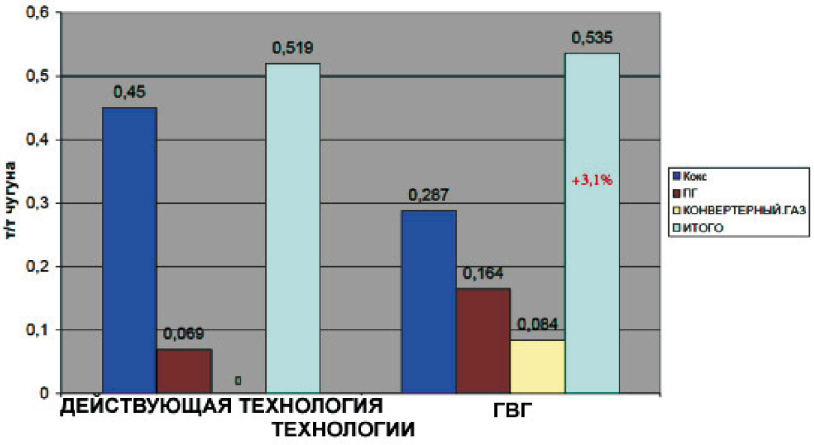


Рис. 7.1. Расход условного топлива

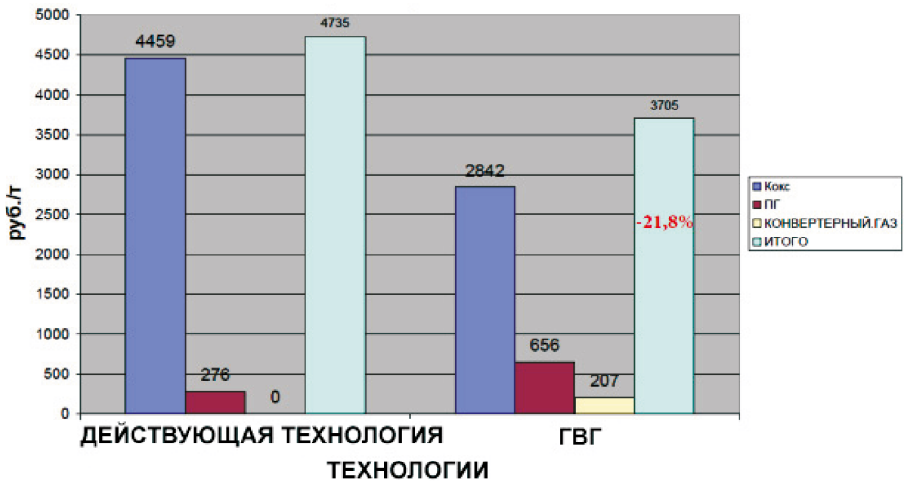
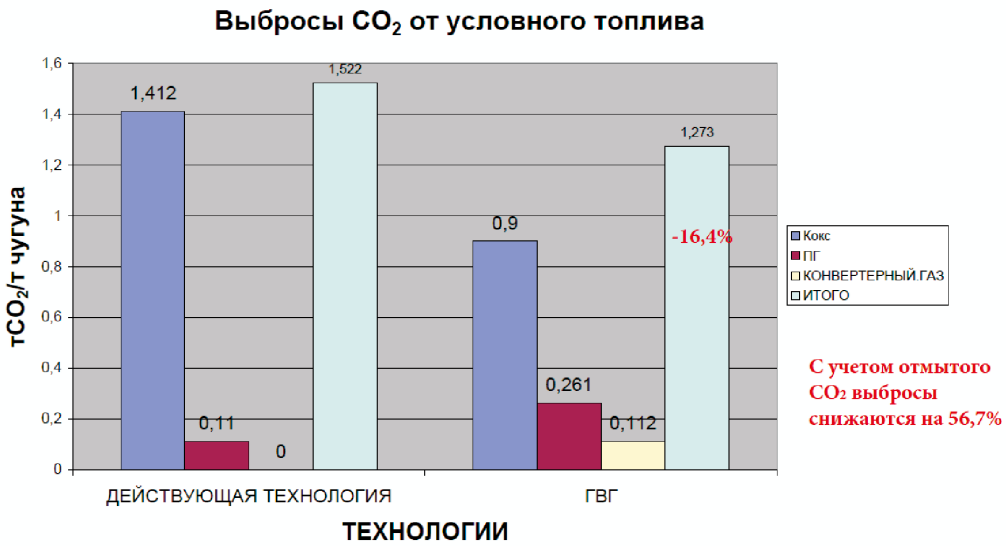


Рис. 7.2. Затраты на условное топливо



С учетом отмытого CO_2 выбросы снижаются на 56,7%

Рис. 7.3. Выбросы CO_2 от условного топлива

Изменение расхода кислорода при использовании технологии ГВГ приведено на Рис. 8.

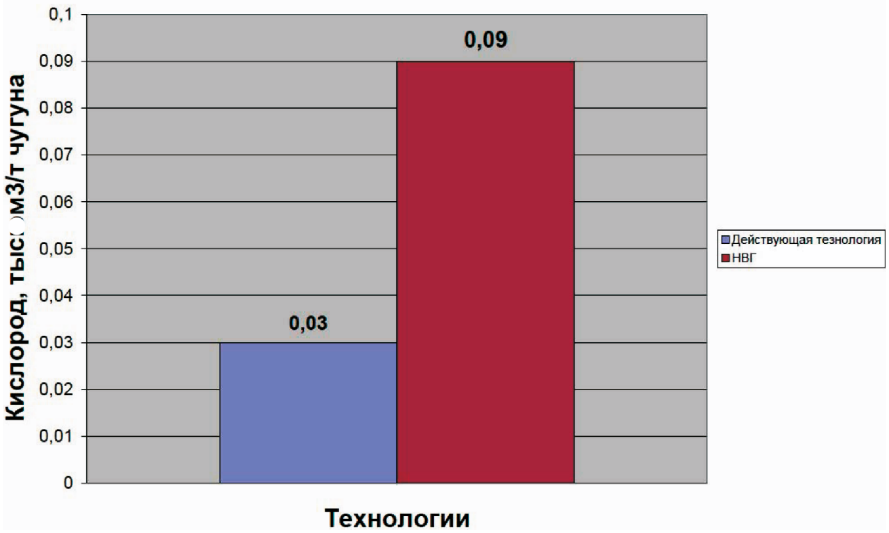


Рис. 8. Изменение расхода кислорода при использовании технологии ГВГ

Изменение расхода дутья при использовании технологии ГВГ приведено на Рис. 9.

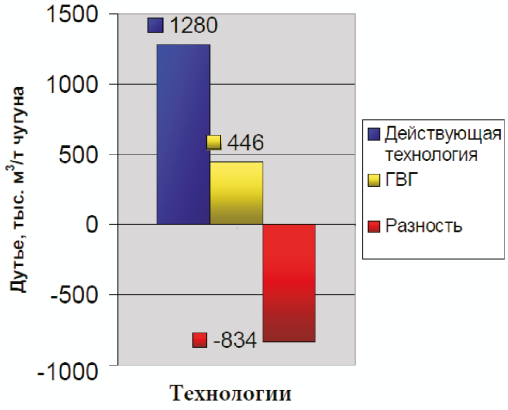


Рис. 9. Изменение расхода дутья при переходе на технологию ГВГ

Снижение себестоимости чугуна и сокращение выбросов CO_2 при использовании технологии ГВГ приведено на Рис. 10.

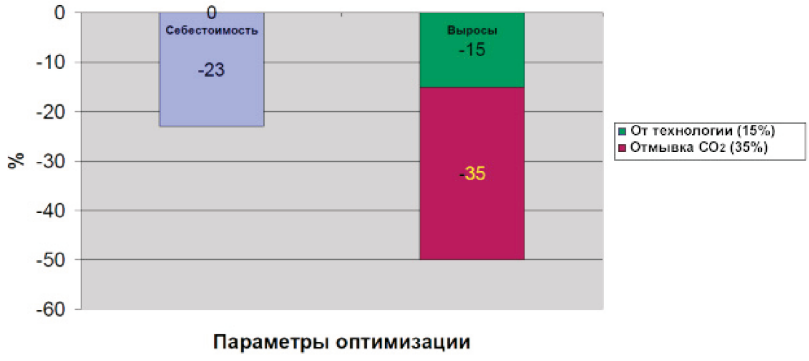


Рис. 10. Общее снижение себестоимости чугуна и сокращение выбросов CO_2

Сумма капиталовложений приведена на Рис. 11.

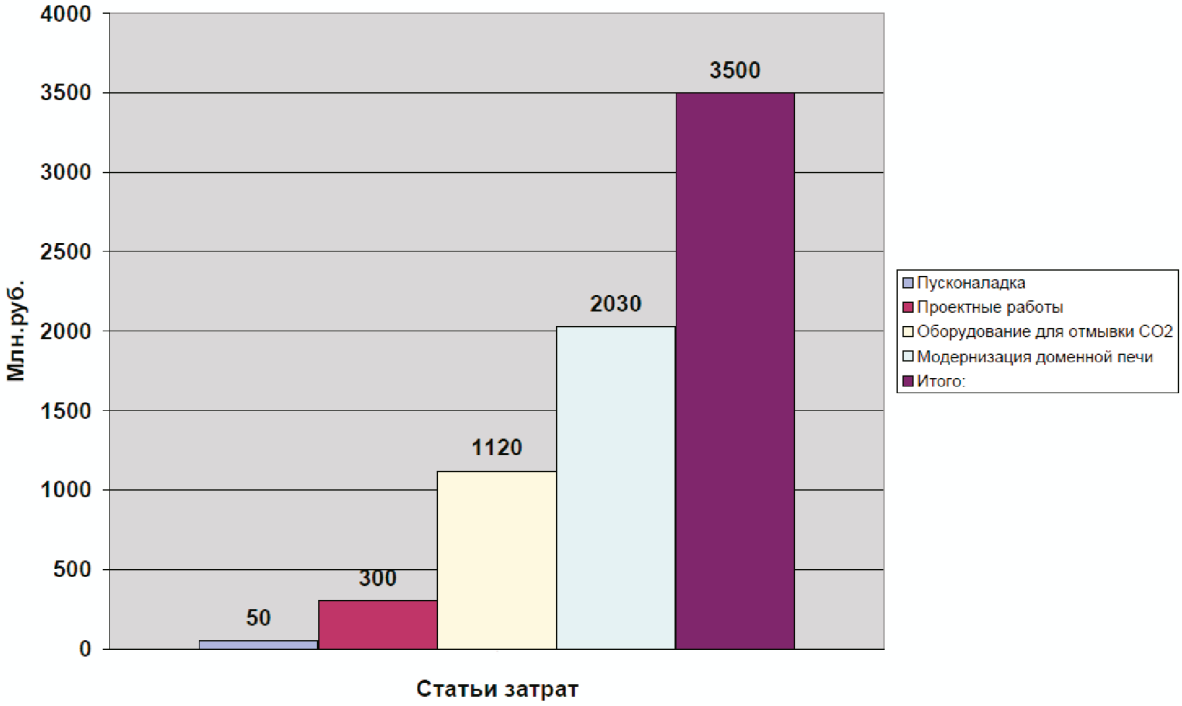


Рис. 11. Итоговая сумма капиталовложений в технологию ГВГ

Влияние технологии ГВГ на удельные показатели энергоемкости чугуна, конвертерной стали и электростали приведены на Рис. 12.

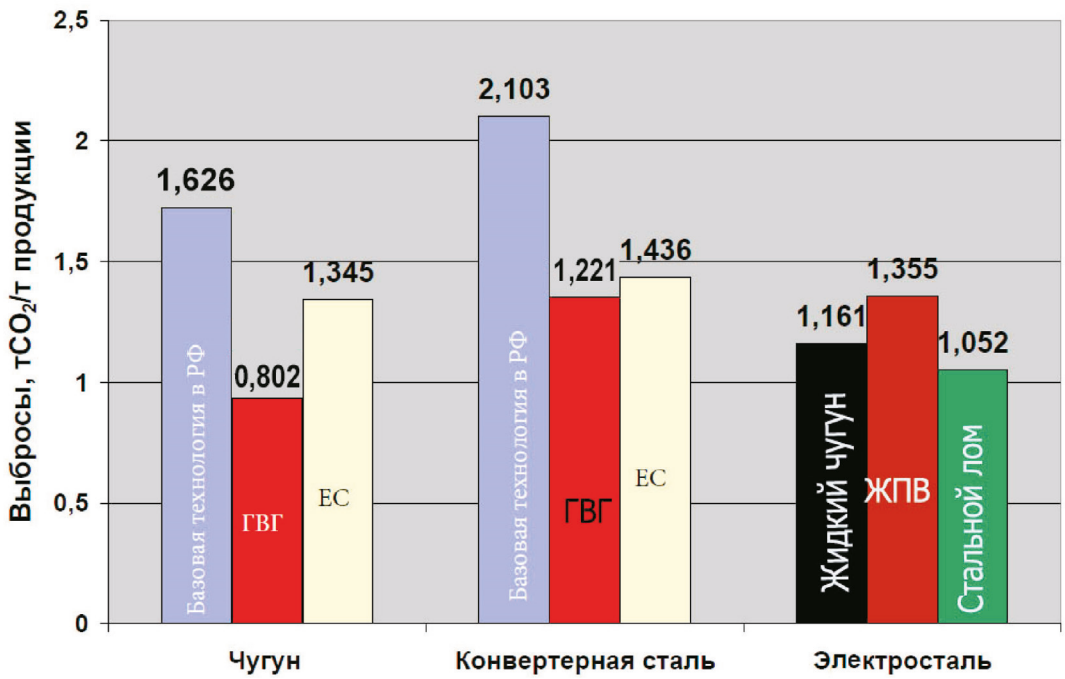


Рис. 12. Показатели удельной энергоемкости чугуна, конвертерной стали и электростали (с отражением в ней выбросов от покупной электроэнергии)

В сопоставимых условиях структуры производства стали в России с ЕС к 2030 г. (конвертер / электропечь = 60 : 40%, МНЛЗ = 100%) показатели удельной энергоемкости чугуна и конвертерной стали в России будут ниже соответственно на 15% и 6 %. Показатели энергоемкости конвертерной стали и различных видов электростали с отражением в них выбросов CO_2 от покупной электроэнергии также существенно сблизятся (разрыв составит 15–25% в пользу электросталеплавильного производства).

Приведенные данные показывают, что технология ГВГ является универсальным проектом, не имеющим аналогов в мировой черной металлургии Данная технология может быть представлена в Госпрограмме «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» (подпрограмма 10 — металлургия) как приоритетный национальный проект.

Список литературы

1. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. М: Металлургия, 1980, 304 с.
2. Воскобойников В.Г., Гохман Ю.И., Жураковский Б.Л. Технические показатели доменной плавки при вдувании горячих восстановительных газов на холодном технологическом кислороде (без атмосферного дутья). М: Сталь № 4, 1971, стр. 303–308.
3. Юсфин Ю.С. Черноусов П.И. и др. Металлургия чугуна. М. ИКЦ, «Академкнига», 2004, 774 с.
4. Сосковец О.Н., Шевелев Л.Н. и др. Применение технологии горячих восстановительных газов для повышения энергоэффективности производства чугуна. М: Сталь № 5, 2014, стр. 103–107.
5. Янван дер Стел, Г.Лоуверсе и др. Доменная печь с рециклингом колошникового газа для минимизации выбросов CO_2. Steel Times international № 31, 2013, стр. 36–38.

Раздел VIII
ПОДГОТОВКА КАДРОВ И ИСТОРИЯ МЕТАЛЛУРГИИ

А.М. Газалиев, К.З. Сарекенов, Р.Б. Султангазиев, КарГТУ
А.А. Акбердин, ХМИ им. Ж. Абишева
КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОЦЕССОМ 556

С.С. Квон, А.З. Исагулов, В.Ю. Куликов, КарГТУ
ОПЫТ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ «МЕТАЛЛУРГИЯ» В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ ИНДУСТРИАЛИЗАЦИИ 589

В.Ю. Куликов, С.С. Квон, КарГТУ
ПОДГОТОВКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ КАДРОВ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ. ФАКТОР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГПИИР-2 593

А.Е. Лазуткин, С.Е. Лазуткин, ГК «МетПром», А.А. Третяк, ООО «Фирма «ТАЛС-1»
ЗАСЛУЖЕННЫЕ ДОМЕНЩИКИ 596

А.М. Газалиев, К.З. Сарекенов, Р.Б. Султангазиев, КарГТУ
А.А. Акбердин, ХМИ им. Ж. Абишева

КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОЦЕССОМ

Анализ истории и тенденции развития мировой промышленности свидетельствует о доминирующей роли доменной технологии в производстве черных металлов. Прогнозы о её свертывании под давлением быстро развивающихся мини-заводов оказались несостоятельными и последние заняли свою обособленную нишу в структуре производства высококачественных сталей.

Можно полагать, что доменная печь была и в обозримом будущем останется основным агрегатом для выплавки самого массового металла — чугуна, последующий передел которого позволяет получать стали и сплавы, отвечающие современным требованиям.

По этой причине остаются в силе сформулированные ещё на заре возникновения доменной технологии задачи по её совершенствованию. Прежде всего, стоит задача более глубокого познания самого процесса на основе достижений современной науки, его адекватного описания, раскрытия неиспользованных возможностей и создания, благодаря этому, новых приемов ведения плавки и управления ею.

В настоящей работе представлена расширенная модель и компьютерная программа для анализа и управления доменным процессом. Модель базируется на алгоритме А.Н. Рамма с дополнениями в части оценки вязкости, температуры кристаллизации, серопоглотительной способности шлаков по данным собственных теоретических и экспериментальных исследований. Для оценки кислотно-основного взаимодействия в шлаках применен критерий оптической основности, базирующийся на электроотрицательности элементов Периодической системы.

Разработан новый подход в расчетном определении производительности доменной печи. Решение критериального уравнения Жа-

воронкова Н.М. позволило предложить метод численной оценки раздельного вклада физических свойств кокса, жидкой фазы, газа в зоне первичного шлакообразования на производительность доменной печи, и на этой основе принимать меры по оптимизации плавки. Программа позволяет в динамическом режиме оценивать последствия принимаемых технологами решений по изменению шихтовых, температурно-дутьевых и иных параметров, выступая в этом плане в качестве советника мастера. В таком режиме программа опробована на доменных печах АО «АрселорМиталл Темиртау». Экономичность процесса оценивается встроенной программой расчета себестоимости чугуна. Программа сопровождается подробным её описанием в презентуемой на настоящей конференции монографии. Удобный интерфейс, наличие примеров решения конкретных задач позволяет рекомендовать её в качестве учебного пособия при изучении курса металлургии чугуна в соответствующих учебных заведениях.

ВВЕДЕНИЕ

Производство изделий промышленного и бытового назначения основано на формировании в них определенного фазового состава. В металлургии, например, этого добиваются легированием и термической обработкой стали. В индустрии каменного литья — подбором природных материалов для попадания в область кристаллизации диопсида $CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2$, в технологии производства высокотемпературной керамики для свечей двигателей внутреннего сгорания — наличием корунда (Al_2O_3), муллита ($3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$) и гексаалюмината кальция ($CaO{\cdot}6Al_2O_3$). Сохранность огнеупорной футеровки металлургических печей обеспечивается правильным сочетанием фазового состава кладки и образующихся в плавильном пространстве шлаков. Только при таком подходе, т.е. целенаправленном формировании фазового состава, можно добиться экономичности процесса и высокого качества конечной продукции. По этой причине поиску оптимального фазового состава намеченных к производству изделий уделяется особое внимание.

Обычно первоначальный подбор фазового состава производится по диаграммам состояния и физических свойств. Однако здесь имеются определенные ограничения. Дело в том, что снять численное значение какого-либо свойства с трехкомпонентной диаграммы можно, с четырехкомпонентной — сложно, а с пяти,- шести — и более компонентной — невозможно, т.к. в трехмерном пространстве они правильно не могут быть изображены. Отметим, что большинство имеющихся в литературе диаграмм трехкомпонентные, а производственные продукты — многокомпонентные.

Поиск требуемого фазового состава можно вести и инструментальными методами: петрографическим, рентгенофазовым, металлографическим. Но в случае необходимости изучения десятков и сотен вариантов шихтовок для получения изделия требуемого свойства, инструментальные методы будут затратными и длительными. Они вообще не могут быть применены в случае наличия у исследователя только химического состава намеченного к добыче сырья. Отметим также, что инструментальные методы применяются, как правило, к твердым, застывшим материалам и их результаты не могут быть отнесены к расплавам из-за возможного распада некоторых фаз при нагреве.

Представляется, что решение поставленной задачи может быть облегчено математическим описанием диаграмм фазового состава. Создание моделей снимает ограничения по количеству присутствующих в изделии компонентов, по температурному диапазону, приближая полученные результаты к производственным условиям.

В настоящей работе предлагается впервые созданная в лаборатории Бор Химико-металлургического института (Караганда) компьютерная программа для расчета фазового состава в системе $CaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO–FeO–Fe_2O_3$. Её прикладной характер широк. Она охватывает процессы производства цементного клинкера, огнеупоров, чугуна, стали, меди, керамики, ситаллов и ряда других.

1. РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАВНОВЕСНОГО ФАЗОВОГО СОСТАВА

При оценке фазового состава шлаков речь чаще всего идет о твердых, застывших шлаках, в которых инструментально (петрографическим, рентгенофазовым анализом) обнаруживают различные фазовые составляющие: силикаты ($2CaO{\cdot}SiO_2$, $CaO{\cdot}SiO_2$), алюминаты ($CaO{\cdot}Al_2O_3$) и т.д.. Огненно-жидкие же шлаки согласно ионной теории являются однофазными, состоящими из простых (Ca^{2+}, Al^{3+} и т.д.) и сложных (SiO_4^{4-}, $Al_2O_7^{5-}$ и др.) ионов. Однако существует и точка зрения о наличии в жидких шлаках ассоциатов, имеющих не только ближний, но и определенный дальний порядок, являющийся результатом ориентационного упорядочения существующих в жидкости комплексов. Внутри этих комплексов возможно усиление жестких ковалентных связей, что дает основание предполагать о большей степени молекулярности расплава относительно твердого вещества [1]. Сказанное позволяет применить к огненно-жидким шлакам разработанные для твердых веществ теоретические и некоторые экспериментальные методы их фазового анализа.

1.1. Графические методы

Наиболее простым является графический метод нахождения фазового состава, использующий известные диаграммы. На рисунке 1 изображена диаграмма фазового состава системы SiO_2–Al_2O_3–MgO в элементарных треугольниках сосуществующих фаз. (На этом рисунке и в дальнейшем по тексту для кратности оксиды обозначены следующим образом: SiO_2 — S; Al_2O_3 — A; $2MgO{\cdot}SiO_2$ — M_2S; $3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$ — A_3S_2 и т.д.). Одним из элементарных треугольников этой системы является SiO_2 (S) — $MgO{\cdot}Al_2O_3$ (MA) — $2MgO{\cdot}SiO_2$ (M_2S). Приняв находящиеся в вершинах этого треугольника соединение за 100%, можно нанести координатную сетку и с её помощью найти фазовый состав шлака по его известному химическому составу. Покажем это на примере. Так, шлак производства углеродистого феррохрома Аксуского завода ферросплавов содержит (мас.%): SiO_2 — 35,1; Al_2O_3 — 18,0 и MgO — 46,9 [2]. Используя внешнюю сетку общей системы SiO_2–Al_2O_3–MgO, можно найти координату шлака приведенного выше состава в элементарном треугольнике S–MA–M_2S. На рисунке она обозначена точкой А. Использование вспомогательной (внутренней) сетки частной системы S–MA–M_2S позволяет найти, что шлак имеет следующий фазовый состав (мас.%): MA ($MgO{\cdot}Al_2O_3$) — 25,0; S (SiO_2) — 5,0 и M_2S ($2MgO{\cdot}SiO_2$) — 70,0, т.е. шлак производства углеродистого феррохрома на АЗФ содержит 25% магнезиальной шпинели, 5% тридимита и 70% форстерита. Графический способ поиска фазового состава может быть ещё более упрощен. Это утверждение основано на том, что, например, если в тройной системе SiO_2–Al_2O_3–MgO содержание двух каких-либо оксидов (SiO_2, Al_2O_3) задано, то третий находится как остаток от 100%:

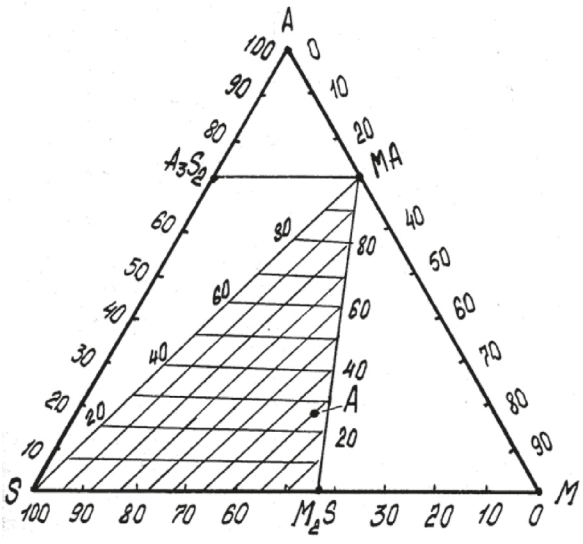


Рис. 1. Диаграмма фазового состава системы SiO_2–Al_2O_3–MgO

$$MgO = 100 - (SiO_2 + Al_2O_3) \quad (1)$$

Это означает, что состав трехкомпонентного шлака на диаграмме может быть задан двумя любыми компонентами. В таком случае можно использовать удобную для практических расчетов прямоугольную систему координат. На рисунке 2 в таких координатах изображена та же фазовая диаграмма трехкомпонентной системы SiO_2–Al_2O_3–MgO. Как видно, она задана двумя компонентами (SiO_2 и Al_2O_3), которых достаточно для идентификации шлака любого состава. Для нахождения фазового состава приведенного выше шлака производства углеродистого феррохрома Аксуского завода ферросплавов достаточно по содержанию в нем только двух таких оксидов как SiO_2 (35,1%) и Al_2O_3 (18,0%) найти его местоположение в поле диаграммы и по вспомогательной сетке частной системы MA–M_2S–S найти, что шлак в качестве фаз содержит 70% M_2S (форстерита), 5% S (тридимита) и 25% MA (магнезиальной шпинели). Результат получен такой же, как и по тройной диаграмме (рисунок 1), но гораздо проще. Следует отметить, что для изображения диаграммы тройной системы в прямоугольных координатах может быть взята любая пара из имеющихся трех компонентов.

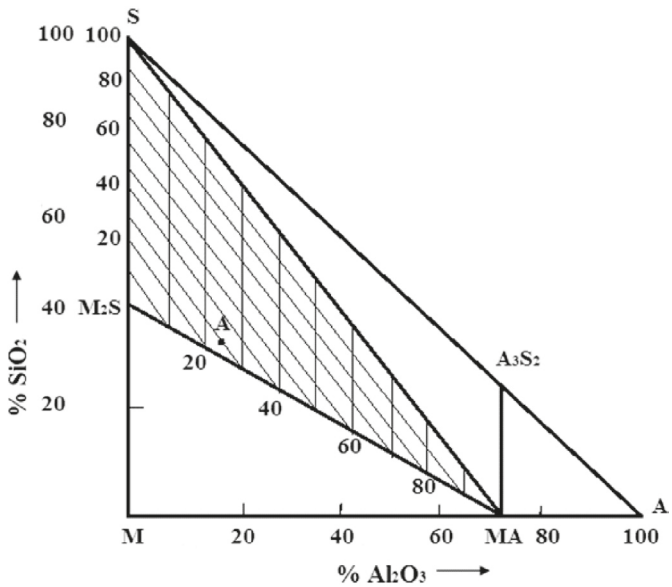


Рис. 2. Изображение трехкомпонентной системы в прямоугольных координатах

Сложнее определять фазовый состав четырехкомпонентных шлаков. Графически диаграмма состояния 4-х-компонентной системы изображается в виде тетраэдра. Определять фазовый состав таких шлаков путем геометрических построений внутри тетраэдра сложно и поэтому предпочитают в таких случаях на плоскости изображать разрезы диаграммы по какому-нибудь компоненту. Возможно это, разумеется, при наличии такой диаграммы и упомянутых разрезов. Процедура нахождения фазового состава шлаков в этом случае схожа с приведенными выше и поэтому мы её не описываем.

Более сложным является решение поставленной задачи в пяти и более компонентных системах. В эвклидовом пространстве при мерности диаграммы большем 4, могут существовать только три выпуклых многогранника: гиперкуб, гипертетраэдр и гипероктаэдр. При разбиении их на элементарные политопы получаются неправильные аналоги этих многогранников и вести геометрические построения для нахождения фазового состава невозможно.

1.2. Математическое описание фазового равновесия

В описанных выше случаях прибегают к математическим методам. Задача сводится к получению уравнения, позволяющего по химическому составу шлака (CaO, SiO_2 и т.д.) находить его фазовый (X). В общем виде это можно записать так: $X = f\cdot(CaO, SiO_2\ldots)$. Над конкретизацией вида этой

зависимости работали многие ученые. Известны в этом плане работы Хиза и Палатника [3, 4]. Как наиболее простой, чаще всего используется метод Хиза. Для сопоставления с предлагаемым ниже нами методом рассмотрим вкратце его суть. Согласно имеющегося в литературе описания, Хиз связывает фазовый состав оксидной системы (шлаки, руды и т.д.) с химическим составом сырья (A_1,A_2,A_3 … A_n) через общий (k_1) и частные коэффициенты (c_1,c_2,c_3 … c_n) при компонентах сырья:

$$X = k_1(c_1A_1 + c_2A_2 + c_3A_3 + \ldots + c_nA_n) \quad (2)$$

Для частной системы A–AB–AC тройной диаграммы A–B–C (рисунок 3) количество вторичной фазы $A_{вт.}$ можно по аналогии найти так:

$$A_{ВТ.} = k_1(c_1A + c_2B + c_3C) \quad (3)$$

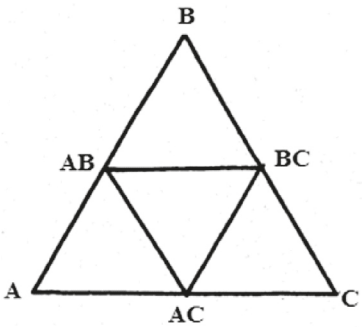


Рис. 3. Диаграмма фазового состава тройной системы A–B–C

Если $A_{вт.}$ положительная величина со значением от 0 до 100%, то уравнение дает ряд линий, ограниченных с одной стороны линией, проходящей через AB–AC, а с другой через A и параллельной AB–AC. Это уравнение будет удовлетворять составам и вне элементарного треугольника A–AB–AC. Это надо иметь в виду для избежания ошибки при расчетах. Когда $A_{вт.} = 0$, то получаем уравнение бинарной системы AB–AC.

$$c_1A + c_2B + c_3C = 0.$$

При наличии двух уравнений необходимо найти три коэффициента (c_1, c_2 и c_3) и поэтому Хизом используется прием превращения одного из коэффициентов в 1. Так, если все члены уравнения (2) разделить на c_1, вынося его за скобки, то получим:

$$X = k_1c_1[A_1 + (c_2/c_1)A_2 + (c_3/c_1)A_3 + \ldots + (c_n/c_1A_n] \quad (4)$$

Переписав уравнение с новым набором констант, получим:

$$X = k(A_1 + b_1A_2 + b_2A_3 + b_3A_4 + \ldots + b_{n-1}A_n) \quad (5)$$

Использование этого приема (деление всех членов на c_1) возможно, если c_1 не равна нулю, что не очевидно. Этот коэффициент (c_1) не всегда равен нулю. Таковым он становится только на граничных поверхностях, примыкающих к A_1. Если в трехкомпонентных системах установить это несложно, то в многокомпонентных (пяти, шести и т.д.) очень затруднительно. Этот искусственный прием метода Хиза лишает его логичности и затрудняет ведение расчета, т.к. деление на ноль может привести к получению бесконечных величин.

Для иллюстрации метода Хиза рассмотрим четверную систему $CaO–MgO–Al_2O_3–SiO_2$ и имеющейся в ней элементарный тетраэдр $S–MS–M_2A_2S_5–CAS_2$. Для вторичной фазы S запишем уравнение типа (5).

$$SS = k(M + b_1S + b_2C + b_3A) \quad (6)$$

При $S_5 = 0$ уравнение 6 является уравнением для вторичной системы $MS–M_2A_2S_5–CAS_2$

$$M + b_1S + b_2C + b_3A = 0 \quad (7)$$

Для нахождения коэффициентов будем производить замены:
1) заменяя MS: $40 + b_1 60 = 0$, найдем $b_1 = –0,667$, где 40 и 60 процентное содержание MgO и SiO_2 в MS;
2) заменяя $M_2A_2S_5$: $13,7 – 0,667 \cdot 51,4 + 35,9\ b_3 = 0$, $b_3 = 0,590$, где 13,7; 51,4 и 35,9 содержание MgO, SiO_2 и Al_2O_3 в $M_2A_2S_5$ соответственно;
3) заменяя CAS_2: — $0,667 \cdot 43,2 + 20,1\ b_2 + 0,590 \cdot 36,7 = 0$, $b_2 = 0,356$, где 43,2; 20,1 и 36,7 содержание SiO_2; CaO и Al_2O_3 в анортите CAS_2 соответственно.

Теперь уравнение 7 запишется так:

$$M = 0,667\ S + 0,356\ C + 0,590\ A = 0 \quad (8)$$

Чтобы найти константу «k» уравнения 6 необходимо задать условие $S_s = 100\%$:

$$S_S = k\ (M – 0,667\ S + 0,356\ C + 0,590)$$
$$100 = k\ (–0,667 \cdot 100) \quad k = 1,5$$

Отсюда уравнение для нахождения вторичной фазы S_S будет:

$$S_S = 1,5(0,667 \cdot S – M – 0,356 \cdot C – 0,590 \cdot A) \quad (9)$$

Подставив в это уравнение химический состав шлака (S, M, C и A), можно найти количество вторичной фазы S_S.

Далее необходимо получить такие же уравнения для других фаз приведенных выше элементарного тетраэдра: $S–MS–M_2A_2S_5–CAS_2$. Уравнение для $M_2A_2S_5$ находим так:

$$M_2A_2S_5 = k(b_1M + b_2S + b_3A + C) \quad (10)$$

Когда $M_2A_2S_5 = 0$, то $b_1M + b_2S + b_3A + C = 0$ — это уравнение для тройной системы $S–MS–CAS_2$. Теперь будем производить замены:

S:	100	$b_2 = 0$	$b_2 = 0$
MS:	0 + 40	$b_1 = 0$	$b_1 = 0$
CAS_2:	20,1 + 34,9	$b_3 = 0$	$b_3 = –0,548$

Откуда C — 0,548 A = 0, что является уравнением для тройной системы.

Теперь, придавая $M_2A_2S_5 = 100$, получим:

$$100 = k(–0,548 \cdot 36,7);\ k = –5,23$$

Итак, $M_2A_2S_5 = 5,23(0,548\ A–C)$, т.е. это уравнение для нахождения $M_2A_2S_5$.

Уравнение для CAS_2 находится проще, т.к. при $CAS_2 = 0$ тройная система $MS–S–M_2A_2S_5$ расположена в граничной системе M–S–A, уравнение которой C = 0, а поэтому $CAS_2 = k\ (C)$. При $CAS_2 = 100\%$ $100 = k\ (20,1)$; k = 4,98 и поэтому:

$$CAS_2 = 4,98 \cdot C \quad (11)$$

Уравнение для MS может быть получено также. Теперь представим перечень уравнений для расчета количества всех фаз в элементарном тетраэдре $S–MS–M_2A_2S_5–CAS_2$:

$$S_S = 1{,}5(0{,}667 \cdot S - M - 0{,}356 \cdot C - 0{,}590 \cdot A)$$
$$MS = 1{,}79(1{,}4 \cdot M + C - 0{,}548 \cdot A)$$
$$M_2A_2S_5 = 5{,}23(0{,}548 \cdot A - C)$$
$$CAS_2 = 4{,}98 \cdot C$$

Перепишем эти уравнения в удобные для расчета формы, перемножив выражения в скобках на постоянные коэффициенты, стоящие перед скобками:

$$S_S = S - 1{,}5 \cdot M - 0{,}534 \cdot C - 0{,}885 \cdot A \quad (12)$$
$$MS = 2{,}5 \cdot M + 1{,}79 \cdot C - 0{,}98 \cdot A \quad (13)$$
$$M_2A_2S_2 = 2{,}86 \cdot A - 5{,}23 \cdot C \quad (14)$$
$$CAS_2 = 4{,}98 \cdot C \quad (15)$$

Если задать состав шлака,% : 25M; 10A; 60S и 5C, конечными фазами которого являются S, CAS_2, $M_2A_2S_5$ и MS, то количество последних можно найти, использовав приведенные выше уравнения:

$$S_s = 1{,}5(0{,}667 \cdot 60 - 25 \cdot 0{,}373 \cdot 5 - 0{,}586 \cdot 10) = 10{,}9\%$$
$$MS = 1{,}79(1{,}4 \cdot 25 + 5 - 0{,}548 \cdot 10) = 61{,}8\%$$
$$M_2A_2S_5 = 5{,}21(0{,}548 \cdot 10 - 5) = 2{,}5\%$$
$$CAS_2 = 4{,}98 \cdot 5 = 24{,}9\%$$

Как видно, метод Хиза использует искусственные приемы, требующие знания необращаемости коэффициентов в ноль, а также расчета не только частных, но и общего коэффициента «k».

2. БАЛАНСОВЫЙ МЕТОД ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА РАВНОВЕСНОГО ФАЗОВОГО СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ

На наш взгляд, можно использовать более простой принцип нахождения уравнений для расчета фазового состава шлаков, т.е. более простой принцип математического описания диаграмм фазового состава. Назван он нами балансовым [5]. Базируется он на балансе распределения исходных компонентов шлака (CaO, SiO_2, Al_2O_3 и т.д.) между образующимися фазами ($2CaO \cdot SiO_2$, $CaO \cdot Al_2O_3$, $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ и т.д.) Поясним это на примере. Пусть, как и в предыдущей задаче, требуется найти уравнение для расчета равновесного фазового состава в элементарном тетраэдре $S–MS–M_2A_2S_5–CAS_2$. Покажем (в виде уравнений) как распределяются исходные компоненты по этим фазам. Для названного элементарного тетраэдра эти уравнения будут такими:

$$CaO = 0{,}201\ CAS_2 \quad (16)$$
$$Al_2O_3 = 0{,}349\ M_2A_2S_5 + 0{,}367\ CAS_2 \quad (17)$$
$$MgO = 0{,}4\ MS + 0{,}137\ M_2A_2S_5 \quad (18)$$
$$SiO_2 = S + 0{,}6\ MS + 0{,}514\ M_2A_2S_5 + 0{,}432\ CAS_2 \quad (19)$$

Первое уравнение показывает, что оксид кальция присутствует только в анортите CAS_2. Содержится он в нем в количестве 20,1% (таблица 1) и поэтому при CAS_2 имеется коэффициент 0,201. Аналогично построены и другие уравнения по распределению исходных оксидов по фазам.

Решая эти четыре уравнения с четырьмя неизвестными относительно образующихся фаз, можно получить искомые уравнения. Из первого уравнения, например, сразу получается выражение для нахождения количества анортита (CAS_2) в элементарном тетраэдре $S–MS–M_2A_2S_5–CAS_2$:

$$CAS_2 = \frac{CaO}{0{,}201};\quad CAS_2 = 4{,}98CaO \text{ или } CAS_2 = 4{,}98C,$$

что, полностью совпадает с данными Хиза, полученными более сложным путем. Простота уравнений позволяет их решать методом подстановок. Полученные таким образом уравнения для всех фаз выглядят так:

$$S_S = S - 1{,}5M - 0{,}534C - 0{,}882A \quad (20)$$
$$MS = 2{,}5M - 0{,}98A + 1{,}79C \quad (21)$$
$$M_2A_2S_5 = 2{,}86A — 5{,}29C \quad (22)$$
$$CAS_2 = 4{,}98C \quad (23)$$

Таблица 1. Химический состав фаз

Фазы	Состав,%			
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO
S	–	100	–	–
MS	–	60	–	40
$M_2A_2S_5$	–	51,4	34,9	13,7
CAS_2	20,1	43,2	36,7	–

Их сопоставление с приведенными выше уравнениями Хиза показывает практически полное совпадение. Имеющиеся расхождения в некоторых цифрах в третьем знаке после запятой объясняются округлением Хизом молекулярных весов оксидов. В тоже время четкий физический смысл, закладываемый в предложенные нами уравнения метода, отсутствие каких-либо ограничений на выбор коэффициентов и простота вычислений говорят о преимуществе предложенного способа расчета фазового состава.

3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ФАЗОВОГО СОСТАВА В СИСТЕМЕ $CaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO–FeO–Fe_2O_3$

Предложенный метод был использован при создании математической модели и компьютерной программы для расчета фазового состава в системе $CaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO–FeO–Fe_2O_3$. Предварительным был этап разбиения (триангуляции) этой системы на элементарные гексатопы (шестивершинники) сосуществующих фаз с использование термодинамически-диаграммного метода [6, 7]. Полученные данные с учетом результатов ранее проведенных нами работ [8] имеют отличия от исследований Бережного [7] в высокоглиноземистой части этой диаграммы.

Было установлено, что изучаемая система слагается из 126 гексатопов (шестивершинников) сосуществующих фаз. Их перечень дан в таблице 2. Для каждого гексатопа с использованием изложенного выше метода выведены балансовые уравнения распределения исходных компонентов по образующимся фазам. Так, для шестивершиннка №1 $C-M-F'–C_3S–C_3A–F'/F$ эти уравнения (балансовые) выглядят так:

$$C_0 = +1\cdot C + 0{,}737\cdot C_3S + 0{,}622\cdot C_3A \quad (24)$$
$$S_0 = +0{,}263\cdot C_3S \quad (25)$$
$$A_0 = +0{,}378\cdot C_3A \quad (26)$$
$$M_0 = 1\cdot M \quad (27)$$
$$F'_0 = +1\cdot F' + 0{,}3103\cdot F'/F \quad (28)$$
$$F_0 = +0{,}6897\cdot F'/F \quad (29)$$

Решая их, можно получить уравнения для нахождения фаз:

$$C = +1\cdot C_0 – 2{,}802\cdot S_0 – 1{,}645\cdot A_0 \quad (30)$$
$$M = +1\cdot M_0 \quad (31)$$

$$F^{/} = +1 \cdot F_0^{/} - 0{,}449 \cdot F_0 \quad (32)$$
$$C_3S = +3{,}802 \cdot S_0 \quad (33)$$
$$C_3A = +2{,}645 \cdot A_0 \quad (34)$$
$$F = +1{,}449 \cdot F_0 \quad (35)$$

В этих уравнениях через C_0, S_0, A_0, M_0, $F^{/}_0$ и F_0 обозначили содержание CaO, SiO_2, Al_2O_3, MgO, FeO и Fe_2O_3 в исходном сырье.

Правильность вывода уравнений проверяется равенством 1 суммы коэффициентов при одноименных фазах. Полученные таким образом для всех 126 гексатопов уравнения (коэффициенты при оксидах) занесены в таблицу 2.

Таблица 2. Коэффициенты уравнений для расчёта равновесного фазового состава в системе CaO–MgO–FeO–Fe_2O_3–Al_2O_3–SiO_2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		1	2	3	4	5	6	7
		C M F' C_3S C_3A F'F	C M C_3S C_3A F'F C_4AF	C M C_3S C_2F C_3AF F'F	M F' C_3S C_2S C_3A F'F	M C_3S C_2S C_3A C_4AF F'F	M C_3S C_2S C_2AF C_2F F'F	M F' C_2S C_3A C_5A_3 F'F
C_0	a_1	1	1	1	0	0	0	0
	a_2	0	0	0	0	4,06	4,06	0
	a_3	0	0	0	4,06	–3,06	–3,06	0
	a_4	0	0	0	–3,06	0	0	3,6
	a_5	0	0	0	0	0	0	–2,6
	a_6	0	0	0	0	0	0	0
M_0	b_1	0	0	0	1	1	1	1
	b_2	1	1	1	0	0	0	0
	b_3	0	0	0	0	0	0	0
	b_4	0	0	0	0	0	0	0
	b_5	0	0	0	0	0	0	0
	b_6	0	0	0	0	0	0	0
F_0'	c_1	0	0,77	1,57	0	0	0	0
	c_2	0	0	0	1	3,13	6,35	1
	c_3	1	0	0	0	–2,36	–4,79	0
	c_4	0	3,77	–3,79	0	3,77	0	0
	c_5	0	3,22	0	0	–6,76	–3,79	0
	c_6	0	–6,76	3,22	0	3,22	3,23	0
F_0	d_1	0	–0,34	–0,70	0	0	0	0
	d_2	0	0	0	–0,45	–1,40	–2,85	–0,45
	d_3	–0,45	0	0	0	1,05	2,15	0
	d_4	0	–1,69	1,70	0	–1,69	0	0
	d_5	0	0	0	0	3,04	1,70	0
	d_6	1,45	3,03	0	1,45	0	0	1,45
A_0	e_1	–1,65	–1,65	–0,55	0	0	0	0
	e_2	0	0	0	0	–6,71	0,03	0
	e_3	0	0	0	–6,70	5,06	–0,02	0
	e_4	0	2,65	–2,67	5,05	2,65	3,66	–3,29
	e_5	2,65	0	4,22	2,65	0	–2,67	4,29
	e_6	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		1	2	3	4	5	6	7
		C M F' C_3S C_3A F'F	C M C_3S C_3A F'F C_4AF	C M C_3S C_2F C_3AF F'F	M F' C_3S C_2S C_3A F'F	M C_3S C_2S C_3A C_4AF F'F	M C_3S C_2S C_2AF C_2F F'F	M F' C_2S C_3A C_5A_3 F'F
S_0	k_1	–2,80	–2,80	–2,80	0	0	0	0
	k_2	0	0	0	0	–7,57	–7,57	0
	k_3	0	3,80	3,80	–7,57	8,57	8,57	2,86
	k_4	3,80	0	0	8,57	0	0	–6,71
	k_5	0	0	0	0	0	0	4,85
	k_6	0	0	0	0	0	0	0

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		8	9	10	11	12	13	14
		M C_2S C_3A C_5A_3 C_4AF F'F	M F' C_2S C_5A_3 CA F'F	M C_2S C_5A_3 CA C_4AF F'F	M F' C_2S CA MA F'F	M C_2S CA MA F'F C_4AF	M C_2S C_2F C_4AF MF F'F	M C_2S MA MF F'F C_4AF
C_0	a_1	0	0	0	0,71	0,71	0,36	0,36
	a_2	0	0	0	0	0	0	0
	a_3	3,60	0	5,24	0	2,82	2,42	–0,64
	a_4	–2,60	5,24	–4,24	2,82	–2,53	0	–0,89
	a_5	0	–4,24	0	–2,53	0	–1,78	0
	a_6	0	0	0	0	0	0	2,17
M_0	b_1	1	1	1	1	1	1	1
	b_2	0	0	0	0	0	0	0
	b_3	0	0	0	0	0	0	0
	b_4	0	0	0	0	0	0	0
	b_5	0	0	0	0	0	0	0
	b_6	0	0	0	0	0	0	0
F_0'	c_1	0	0	0	0	1,68	0,56	0,56
	c_2	0	1	0	1	0	0	0
	c_3	6,54	0	12,25	0	8,81	0	0
	c_4	–2,00	0	–7,71	0	–5,93	0	–2,78
	c_5	–6,76	0	–6,76	0	3,23	–2,79	3,22
	c_6	3,22	0	3,22	0	–6,79	3,23	0
F_0	d_1	0	0	0	0	–0,75	–0,25	–0,25
	d_2	0	–0,45	0	–0,45	0	0	0
	d_3	–2,94	0	–5,51	0	–3,96	0	0
	d_4	0,90	0	3,47	0	2,66	0	1,25
	d_5	3,04	0	3,04	0	0	1,25	0
	d_6	0	1,45	0	1,45	3,05	0	0
A_0	e_1	0	0	0	–0,39	–0,39	–0,39	–0,39
	e_2	0	0	0	0	0	0	0
	e_3	–3,29	0	–2,89	0	0	–5,29	1,39
	e_4	4,29	–2,88	3,89	0	1,39	4,74	0
	e_5	0	3,88	0	1,39	0	1,94	0
	e_6	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		8	9	10	11	12	13	14
		M C_2S C_3A C_5A_3 C_4AF F'F	M F' C_2S C_5A_3 CA F'F	M C_2S C_5A_3 CA C_4AF F'F	M F' C_2S CA MA F'F	M C_2S CA MA F'F C_4AF	M C_2S C_2F C_4AF MF F'F	M C_2S MA MF F'F C_4AF
S_0	k_1	0	0	0	–1,34	–1,34	–0,67	–0,67
	k_2	2,86	0	2,86	0	2,86	2,87	2,87
	k_3	–6,71	2,86	–9,78	2,86	–5,25	–4,52	1,19
	k_4	4,85	–9,78	7,92	–5,25	4,73	0	1,66
	k_5	0	7,92	0	4,73	0	3,32	0
	k_6	0	0	0	0	0	0	–4,05

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		15	16	17	18	19	20	21
		M F' C_2S C_3MS_2 MA F'F	M C_2S C_3MS_2 MA MF F'F	M F' C_3MS_2 CMS MA F'F	M C_3MS_2 CMS MA MF F'F	M F' CMS M_2S MA F'F	M CMS M_2S MA MF F'F	M_2S CMS F' MA F'A F'F
C_0	a_1	0,73	0,73	0,71	0,71	0,72	0,72	–2,51
	a_2	0	6,19	0	5,82	0	2,79	2,79
	a_3	6,19	–5,92	5,82	–5,53	2,79	–2,51	1,28
	a_4	–5,92	0	–5,53	0	–2,51	0	2,54
	a_5	0	0	0	0	0	0	–3,10
	a_6	0	0	0	0	0	0	0
M_0	b_1	1	1	1	1	1	1	0
	b_2	0	0	0	0	0	0	0
	b_3	0	0	0	0	0	0	1,78
	b_4	0	0	0	0	0	0	3,53
	b_5	0	0	0	0	0	0	–4,31
	b_6	0	0	0	0	0	0	0
F_0'	c_1	0	0,56	0	0,56	0	0,56	0
	c_2	1	0	1	0	1	0	1
	c_3	0	0	0	0	0	0	0
	c_4	0	0	0	0	0	0	0
	c_5	0	–2,79	0	–2,79	0	–2,79	0
	c_6	0	3,23	0	3,23	0	3,23	0
F_0	d_1	0	–0,25	0	–0,25	0	–0,25	0
	d_2	–0,45	0	–0,45	0	–0,45	0	–0,45
	d_3	0	0	0	0	0	0	0
	d_4	0	0	0	0	0	0	0
	d_5	0	1,25	0	1,25	0	1,25	0
	d_6	1,45	0	1,45	0	1,45	0	1,45
A_0	e_1	–0,39	–0,39	–0,39	–0,39	–0,39	–0,39	0
	e_2	0	0	0	0	0	0	0
	e_3	0	0	0	0	0	0	–0,70
	e_4	0	1,39	0	1,39	0	1,39	0
	e_5	1,39	0	1,39	0	1,39	0	1,70
	e_6	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		15	16	17	18	19	20	21
		M F' C_2S C_3MS_2 MA F'F	M C_2S C_3MS_2 MA MF F'F	M F' C_3MS_2 CMS MA F'F	M C_3MS_2 CMS MA MF F'F	M F' CMS M_2S MA F'F	M CMS M_2S MA MF F'F	M_2S CMS F' MA F'A F'F
S_0	k_1	–1,36	–1,36	–1,34	–1,34	–1,34	–1,34	2,34
	k_2	0	–8,69	0	–5,43	0	0	0
	k_3	–8,69	11,05	–5,43	7,77	0	2,34	–2,39
	k_4	11,05	0	7,77	0	2,34	0	–4,74
	k_5	0	0	0	0	0	0	5,79
	k_6	0	0	0	0	0	0	0

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		22	23	24	25	26	27	28
		M_2S CMS C_2MS_2 MA F'A F'F	M_2S CMS C_2MS_2 MA MF F'F	M_2S CMS CF'S F' F'A F'F	M_2S CMS CF'S C_2MS_2 F'A F'F	M_2S C_2MS_2 CAS_2 MA F'A F'F	M_2S CMS_2 CAS_2 C_2MS_2 F'A F'F	M_2S C_2MS_2 CAS_2 MA MF F'F
C_0	a_1	–2,51	–2,51	–2,51	–2,51	–1,44	0	–1,43
	a_2	8,35	8,35	5,57	8,35	3,48	–3,87	3,48
	a_3	–4,84	–4,84	–3,34	0	–2,13	0	–2,13
	a_4	0	0	1,28	–4,84	1,09	4,87	1,09
	a_5	0	0	0	0	0	0	0
	a_6	0	0	0	0	0	0	0
M_0	b_1	0	0	0	0	1,00	2,32	1,00
	b_2	7,73	7,73	3,87	7,74	0,97	–3,58	0,98
	b_3	–6,73	–6,73	–4,65	0	–1,98	0	–1,97
	b_4	0	0	1,78	–6,74	1,01	2,26	1,01
	b_5	0	0	0	0	0	0	0
	b_6	0	0	0	0	0	0	0
F_0'	c_1	0	0	0	0	0,56	–1,31	0,56
	c_2	4,34	4,35	0	2,18	0,54	5,03	0,55
	c_3	–3,78	–3,80	0	2,62	–1,11	–3,88	–1,11
	c_4	–1,98	0	1	–3,80	–1,41	–1,26	0,57
	c_5	2,42	–2,79	0	0	2,42	2,42	–2,79
	c_6	0	3,22	0	0	0	0	3,22
F_0	d_1	0	0	0	0	–0,25	0,59	–0,25
	d_2	–1,95	–1,96	0	–0,98	–0,24	–2,26	–0,24
	d_3	1,70	1,71	0	–1,18	0,49	1,74	0,50
	d_4	0,89	0	–0,45	1,71	0,64	0,57	–0,26
	d_5	–1,09	1,25	0	0	–1,09	–1,09	1,25
	d_6	1,45	0	1,45	1,45	1,45	1,45	0
A_0	e_1	0	0	0	0	–0,39	0,92	–0,39
	e_2	–3,05	–3,05	0	–1,53	–0,38	–3,54	–0,38
	e_3	2,66	2,66	0	–1,84	0,78	2,73	0,78
	e_4	1,39	1,39	–0,70	2,67	0,99	0,89	0,99
	e_5	0	0	1,70	1,70	0	0	0
	e_6	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		22	23	24	25	26	27	28
		M_2S CMS C_2MS_2 MA F'A F'F	M_2S CMS C_2MS_2 MA MF F'F	M_2S CMS CF'S F' F'A F'F	M_2S CMS CF'S C_2MS_2 F'A F'F	M_2S C_2MS_2 CAS_2 MA F'A F'F	M_2S CMS_2 CAS_2 C_2MS_2 F'A F'F	M_2S C_2MS_2 CAS_2 MA MF F'F
S_0	k_1	2,34	2,34	2,34	2,34	1,00	–0,78	1,00
	k_2	–10,38	–10,38	–5,19	–10,38	–1,30	4,81	–1,30
	k_3	9,04	9,04	6,23	0	2,65	0	2,65
	k_4	0	0	–2,38	9,04	–1,35	–3,03	–1,35
	k_5	0	0	0	0	0	0	0
	k_6	0	0	0	0	0	0	0

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		29	30	31	32	33	34	35
		M_2S CMS_2 CAS_2 C_2MS_2 MF F'F	M_2S MS CMS_2 CAS_2 MF F'F	M_2S MS $M_2A_2S_5$ CAS_2 MF F'F	M_2S $M_2A_2S_5$ CAS_2 MA MF F'F	M_2S $M_2A_2S_5CAS_2$ MA F'A F'F	M_2S $F_2'S$ CMS_2 CAS_2 F'A F'F	M_2S $F_2'S$ CF'S F' F'A F'F
C_0	a_1	0	2,53	1,27	1,25	1,25	–3,14	0
	a_2	–3,87	–5,39	–0,03	–5,21	–5,21	–2,73	–3,64
	a_3	0	3,86	–5,19	4,95	4,95	9,69	3,36
	a_4	4,87	0	4,95	0,01	0,01	–7,48	1,28
	a_5	0	0	0	0	0	4,68	0
	a_6	0	0	0	0	0	0	0
M_0	b_1	2,32	3,50	3,49	1,75	1,75	0,87	1,74
	b_2	–3,58	–2,50	–2,49	–1,45	–1,45	–1,26	–2,52
	b_3	0	0	0	0	0	2,70	0
	b_4	2,26	0	0	0,70	0,70	–3,47	1,78
	b_5	0	0	0	0	0	2,16	0
	b_6	0	0	0	0	0	0	0
F_0'	c_1	1,31	1,97	1,97	0,98	0,98	–0,49	0
	c_2	–2,02	–1,41	–1,40	–0,82	–0,81	0,71	0
	c_3	0	0	0	0	0	1,52	0
	c_4	1,27	0	0	0,39	–1,58	–1,95	1
	c_5	–2,78	–2,79	–2,79	–2,78	2,42	1,21	0
	c_6	3,22	3,23	3,22	3,23	0	0	0
F_0	d_1	–0,59	–0,88	–0,88	–0,44	–0,44	0,22	0
	d_2	0,91	0,63	0,63	0,37	0,37	–0,32	0
	d_3	0	0	0	0	0	–0,68	0
	d_4	–0,57	0	0	–0,18	–0,18	0,87	–0,45
	d_5	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	–0,54	0
	d_6	0	0	0	0	0	1,45	1,45
A_0	e_1	0,92	1,38	2,07	–0,69	–0,69	0,34	0
	e_2	–3,54	–0,98	–3,93	0,57	0,57	–0,49	0
	e_3	2,73	–2,13	2,86	0	0	–1,07	0
	e_4	0,89	2,73	0	1,17	1,12	1,37	0,70
	e_5	0	0	0	0	0	0,85	1,70
	e_6	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		29	30	31	32	33	34	35
		M_2S CMS_2 CAS_2 C_2MS_2 MF F'F	M_2S MS CMS_2 CAS_2 MF F'F	M_2S MS $M_2A_2S_5$ CAS_2 MF F'F	M_2S $M_2A_2S_5$ CAS_2 MA MF F'F	M_2S $M_2A_2S_5CAS_2$ MA F'A F'F	M_2S $F_2'S$ CMS_2 CAS_2 F'A F'F	M_2S $F_2'S$ CF'S F' F'A F'F
S_0	k_1	–0,78	–2,35	–2,35	0	0	1,18	0
	k_2	4,81	3,35	3,35	1,95	1,95	1,70	3,39
	k_3	0	0	0	0	0	–3,63	0
	k_4	–3,03	0	0	–0,95	–0,95	4,65	–2,39
	k_5	0	0	0	0	0	–2,90	0
	k_6	0	0	0	0	0	0	0

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		36	37	38	39	40	41	42
		M_2S $F_2'S$ CF'S C_2MS_2 F'A F'F	M_2S $F_2'S$ C_2MS_2 CMS_2 F'A F'F	M_2S $F_2'S$ $M_2A_2S_5$ CAS_2 F'A F'F	M_2S $F_2'S$ MS $M_2A_2S_5$ CAS_2 F'F	M_2S $F_2'S$ MS CMS_2 CAS_2 F'F	$F_2'S$ CF'S C_2MS_2 $C_2F'S_2$ F'A F'F	$F_2'S$ C_2MS_2 $C_2F'S_2$ $CF'S_2$ F'A F'F
C_0	a_1	–2,52	0	1,26	1,27	2,52	–3,66	0,01
	a_2	0	0	0	0	0	10,15	0
	a_3	3,94	4,87	–5,21	–0,03	–5,38	0	5,42
	a_4	–0,42	–3,87	4,95	–5,19	3,86	–5,49	–4,43
	a_5	0	0	0	4,95	0	0	0
	a_6	0	0	0	0	0	0	0
M_0	b_1	0	2,32	2,09	3,49	3,49	–0,06	3,37
	b_2	0	0	–0,50	0	0	9,49	6,76
	b_3	3,64	2,26	–1,45	–2,49	–2,49	6,76	–4,99
	b_4	–2,64	–3,58	0	0	0	–15,19	–4,14
	b_5	0	0	0,86	0	0	0	0
	b_6	0	0	0	0	0	0	0
F_0'	c_1	–0,98	0,33	0,19	0,98	0,98	–0,02	1,89
	c_2	1,42	1,42	1,13	1,42	1,42	5,29	0
	c_3	2,04	1,26	–0,81	–1,40	–1,40	0	1,41
	c_4	–1,48	–2,01	0	0	0	–4,27	–2,30
	c_5	0	0	0,49	0	0	0	0
	c_6	0	0	0	0	0	0	0
F_0	d_1	0,44	–0,15	–0,08	0,44	0,44	0	–0,85
	d_2	–0,64	–0,63	–0,51	–0,64	–0,64	–2,37	0
	d_3	–0,92	–0,57	0,36	–0,63	–0,63	0	–0,64
	d_4	0,67	0,90	0	0	0	1,92	1,04
	d_5	0	0	–0,21	0	0	0	0
	d_6	1,45	1,45	1,44	1,45	1,45	1,45	1,45
A_0	e_1	0,69	–0,23	–0,14	2,07	–0,80	0,01	–1,33
	e_2	–0,99	–0,99	–0,79	0	0,54	–3,72	0
	e_3	–1,44	–0,89	0,57	–3,94	1,99	0	–0,99
	e_4	1,04	1,41	0	2,87	–1,81	3,01	1,62
	e_5	1,70	1,70	1,36	0	2,31	1,70	1,70
	e_6	0	0	0	0	–1,23	0	0

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		36	37	38	39	40	41	42
		M_2S $F_2'S$ $CF'S$ C_2MS_2 $F'A$ $F'F$	M_2S $F_2'S$ C_2MS_2 CMS_2 $F'A$ $F'F$	M_2S $F_2'S$ $M_2A_2S_5$ CAS_2 $F'A$ $F'F$	M_2S $F_2'S$ MS $M_2A_2S_5$ CAS_2 $F'F$	M_2S $F_2'S$ MS CMS_2 CAS_2 $F'F$	$F_2'S$ $CF'S$ C_2MS_2 $C_2F'S_2$ $F'A$ $F'F$	$F_2'S$ C_2MS_2 $C_2F'S_2$ $CF'S_2$ $F'A$ $F'F$
S_0	k_1	2,34	–0,77	–0,47	–2,35	–2,35	3,43	–1,14
	k_2	0	0	0,68	0	0	–12,64	0
	k_3	–1,89	–3,03	1,95	3,35	3,35	0	–3,38
	k_4	3,55	4,80	0	0	0	10,21	5,52
	k_5	0	0	–1,16	0	0	0	0
	k_6	0	0	0	0	0	0	0

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		43	44	45	46	47	48	49
		$F_2'S$ C_2MS_2 CMS_2 $CF'S_2$ $F'A$ $F'F$	$F_2'S$ CMS_2 $CF'S_2$ CAS_2 $F'A$ $F'F$	$F_2'S$ MS $F'S$ CMS_2 CAS_2 $F'F$	$F_2'S$ $F'S$ CMS_2 $CF'S_2$ CAS_2 $F'F$	$F_2'S$ $F'S$ MS $M_2A_2S_5$ CAS_2 $F'F$	$F_2'S$ $F'S$ $M_2A_2S_5$ $F_2'A_2S_5CAS_2$ $F'F$	$F_2'S$ $M_2A_2S_5$ $F_2'A_2S_5$ $CAS_2F'A$ $F'F$
C_0	a_1	0	–7,27	3,66	3,65	1,84	1,81	1,81
	a_2	4,87	0	–1,79	–7,07	–2,38	0,01	0
	a_3	–3,88	11,07	–4,73	0	1,78	0	–5,76
	a_4	0,01	–7,44	3,86	4,42	–5,19	–5,77	4,95
	a_5	0	4,64	0	0	4,95	4,95	0
	a_6	0	0	0	0	0	0	0
M_0	b_1	3,38	–0,01	5,06	5,09	5,07	5,02	2,54
	b_2	2,27	5,38	2,49	–3,30	–6,56	–3,21	7,25
	b_3	3,57	–3,06	–6,55	5,37	2,49	7,24	–9,63
	b_4	–8,22	–3,48	0	–6,16	0	–8,05	0
	b_5	0	2,17	0	0	0	0	0,84
	b_6	0	0	0	0	0	0	0
F_0'	c_1	1,89	0	2,84	2,84	2,84	2,84	1,42
	c_2	1,27	0	0	–1,84	–1,84	–1,84	0
	c_3	–1,01	1,73	–1,84	0	0	0	–0,90
	c_4	–1,15	–1,94	0	0	0	0	0
	c_5	0	1,21	0	0	0	0	0,48
	c_6	0	0	0	0	0	0	0
F_0	d_1	–0,85	0	–1,28	–1,28	–1,28	–1,28	–0,64
	d_2	–0,57	0	0	0,83	0,83	0,83	0
	d_3	0,45	–0,78	0,83	0	0	0	0,41
	d_4	0,52	0,87	0	0	0	0	0
	d_5	0	–0,54	0	0	0	0	–0,22
	d_6	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45
A_0	e_1	–1,33	0	2,00	2,00	3,00	3,02	–0,99
	e_2	–0,89	0	0,99	–1,29	–3,89	–5,20	0
	e_3	0,71	1,22	–2,59	0	–0,98	0	0,63
	e_4	0,81	–1,37	–2,13	–2,44	2,87	3,18	0
	e_5	1,70	0,85	2,73	2,73	0	0	1,36
	e_6	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		43	44	45	46	47	48	49
		F_2'S C_2MS_2 CMS_2 $CF'S_2$ F'A F'F	F_2'S CMS_2 $CF'S_2$ CAS_2 F'A F'F	F_2'S MS F'S CMS_2 CAS_2 F'F	F_2'S F'S CMS_2 $CF'S_2$ CAS_2 F'F	F_2'S F'S MS $M_2A_2S_5$ CAS_2 F'F	F_2'S F'S $M_2A_2S_5$ $F_2'A_2S_5CAS_2$ F'F	F_2'S $M_2A_2S_5$ $F_2'A_2S_5$ CAS_2 F'A F'F
S_0	k_1	–1,13	3,39	–3,40	–3,40	–3,40	–3,40	0
	k_2	–3,04	0	0	4,40	4,40	4,40	0
	k_3	2,42	–4,14	4,40	0	0	0	2,15
	k_4	2,75	4,64	0	0	0	0	0
	k_5	0	–2,89	0	0	0	0	–1,15
	k_6	0	0	0	0	0	0	0

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		50	51	52	53	54	55	56
		C_3MS_2 CMS C_2MS_2 MA MF F'F	C_3MS_2 CMS CF'S C_2MS_2 F'A F'F	C_3MS_2 CMS F' MA F'A F'F	C_3MS_2 CMS CF'S F' F'A F'F	C_3MS_2 CMS C_2MS_2 MA F'A F'F	C_3MS_2 C_2MS_2 MA MF F'F F	C_2S C_3MS_2 MA MF F'F F
C_0	a_1	5,81	5,82	5,82	5,82	5,82	5,82	6,19
	a_2	–0,02	–0,02	–5,53	–2,77	–0,02	–4,82	–5,92
	a_3	–4,79	0	1,27	–3,31	–4,80	0	0
	a_4	0	–4,80	2,51	1,26	0	–0,01	3,61
	a_5	0	0	–3,07	0	0	0	0
	a_6	0	0	0	0	0	0,01	–2,88
M_0	b_1	–0,01	0	0	0	0	0	0
	b_2	7,74	7,74	0	3,88	7,74	0	0
	b_3	–6,73	0	1,78	–4,65	–6,74	0	0
	b_4	0	–6,74	3,53	1,77	0	4,95	4,95
	b_5	0	0	–4,31	0	0	0	0
	b_6	0	0	0	0	0	–3,95	–3,95
F_0'	c_1	0	0	0	0	0	0	0
	c_2	4,36	2,18	0	0	4,34	0	0
	c_3	–3,79	2,62	1	0	–3,78	0	0
	c_4	0	–3,80	0	1	–1,98	0	0
	c_5	–2,79	0	0	0	2,42	3,23	3,22
	c_6	3,22	0	0	0	0	–2,23	–2,22
F_0	d_1	0	0	0	0	0	0	0
	d_2	–1,96	–0,98	0	0	–1,95	0	0
	d_3	1,71	–1,18	–0,45	0	1,70	0	0
	d_4	0	1,71	0	–0,45	0,89	0	0
	d_5	1,25	0	0	0	–1,09	0	0
	d_6	0	1,45	1,45	1,45	1,45	1	1
A_0	e_1	0	0	0	0	0	0	0
	e_2	–3,05	–1,53	0	0	–3,05	0	0
	e_3	2,66	–1,84	–0,70	0	2,66	1,39	1,39
	e_4	1,39	2,67	0	–0,70	1,39	–1,95	–1,95
	e_5	0	1,70	1,70	1,70	0	0	0
	e_6	0	0	0	0	0	1,56	1,56

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		50	51	52	53	54	55	56
		C_3MS_2 CMS C_2MS_2 MA MF F'F	C_3MS_2 CMS CF'S C_2MS_2 F'A F'F	C_3MS_2 CMS F' MA F'A F'F	C_3MS_2 CMS CF'S F' F'A F'F	C_3MS_2 CMS C_2MS_2 MA F'A F'F	C_3MS_2 C_2MS_2 MA MF F'F F	C_2S C_3MS_2 MA MF F'F F
S_0	k_1	–5,42	–5,42	–5,43	–5,42	–5,42	–5,42	–8,69
	k_2	–2,57	–2,58	7,77	2,58	–2,58	6,76	11,05
	k_3	8,99	0	–2,38	6,21	9,00	0	0
	k_4	0	9,00	–4,72	–2,37	0	–1,65	–6,73
	k_5	0	0	5,76	0	0	0	0
	k_6	0	0	0	0	0	1,31	5,37

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		57	58	59	60	61	62	63
		C_2S C_3MS_2 C_2MS_2 MA F'F F	C_2S C_3MS_2 C_2MS_2 MA F'A F'F	C_2S C_3MS_2 CF'S C_2MS_2 F'A F'F	C_2S C_3MS_2 F' MA F'A F'F	C_2S C_3MS_2 CF'S F' F'A F'F	C_2S CF'S C_2MS_2 $C_2F'S_2$ F'A F'F	C_2S C_2MS_2 $C_2F'S_2$ C_2AS F'A F'F
C_0	a_1	0,02	0,02	0,02	6,19	3,07	3,09	4,62
	a_2	5,77	5,77	5,77	–5,92	0	3,37	0
	a_3	–4 ,79	–4 ,79	0	1,30	–3,35	0	–2,72
	a_4	0	0	–4 ,79	2,57	1,28	–5,46	–2,45
	a_5	0	0	0	–3,14	0	0	1,55
	a_6	0	0	0	0	0	0	0
M_0	b_1	–8,47	–8,47	–8,47	0	–4,29	0,05	4,31
	b_2	16,05	16,05	16,05	0	8,13	9,38	6,76
	b_3	–6,58	–6,58	0	1,78	–4,59	6,76	–7,57
	b_4	0	0	–6,58	3,53	1,75	–15,19	–6,82
	b_5	0	0	0	–4,31	0	0	4,32
	b_6	0	0	0	0	0	0	0
F_0'	c_1	0	–4,75	–2,38	0	0	0,01	2,41
	c_2	0	9,00	4,51	0	0	5,26	0
	c_3	0	–3,69	2,62	1	0	0	–0,01
	c_4	0	–1,98	–3,75	0	1	–4,27	–3,82
	c_5	3,23	2,42	0	0	0	0	2,42
	c_6	–2,23	0	0	0	0	0	0
F_0	d_1	0	2,13	1,07	0	0	0	–1,08
	d_2	0	–4,05	–2,03	0	0	–2,36	0
	d_3	0	1,65	–1,18	–0,45	0	0	0
	d_4	0	0,89	1,69	0	–0,45	1,92	1,72
	d_5	0	–1,08	0	0	0	0	–1,09
	d_6	1	1,45	1,45	1,45	1,45	1,44	1,45
A_0	e_1	3,34	3,34	1,68	0	0	–0,01	–1,69
	e_2	–6,33	–6,34	–3,18	0	0	–3,70	0
	e_3	2,59	2,59	–1,84	–0,70	0	0	0
	e_4	1,39	1,39	2,64	0	–0,70	3,01	2,69
	e_5	0	0	1,70	1,70	1,70	1,70	0
	e_6	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		57	58	59	60	61	62	63
		C_2S C_3MS_2 C_2MS_2 MA F'F F	C_2S C_3MS_2 C_2MS_2 MA F'A F'F	C_2S C_3MS_2 CF'S C_2MS_2 F'A F'F	C_2S C_3MS_2 F' MA F'A F'F	C_2S C_3MS_2 CF'S F' F'A F'F	C_2S CF'S C_2MS_2 $C_2F'S_2$ F'A F'F	C_2S C_2MS_2 $C_2F'S_2$ C_2AS F'A F'F
S_0	k_1	2,82	2,82	2,82	–8,69	–2,86	–2,89	–5,75
	k_2	–10,77	–10,77	–10,77	11,04	0	–6,29	0
	k_3	8,95	8,95	0	–2,42	6,24	0	5,08
	k_4	0	0	8,95	–4,80	–2,38	10,18	4,58
	k_5	0	0	0	5,87	0	0	–2,90
	k_6	0	0	0	0	0	0	0

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		64	65	66	67	68	69	70
		C_2S C_2F C_4AF CF MF F'F	C_2S C_4AF CF MA MF F'F	C_2S C_4AF CF CA MA F'F	C_2S CA CF CF_2 MA F'F	C_2S CF CF_2 MA MF F'F	C_2S F' CA MA F'A F'F	C_2S C_2AS CA MA F'A F'F
C_0	a_1	0	0	0	0	0	0	3,07
	a_2	4,84	4,34	4,36	0	7,67	1,28	–4,89
	a_3	0	–3,86	–1,93	7,67	–6,67	2,81	2,82
	a_4	–3,84	–1,27	–1,43	–6,67	0	0	0
	a_5	0	1,79	0	0	0	–3,09	0
	a_6	0	0	0	0	0	0	0
M_0	b_1	0	0	0	0	0	0	4,28
	b_2	6,71	6,03	6,07	–3,93	5,30	1,78	–6,82
	b_3	0	–10,69	–2,69	10,69	–9,25	0	0,01
	b_4	–10,66	–1,78	–5,91	–9,29	0	3,53	3,53
	b_5	4,95	7,44	3,53	3,53	4,95	–4,31	0
	b_6	0	0	0	0	0	0	0
F_0'	c_1	0	0	0	0	0	0	2,40
	c_2	3,78	3,40	3,40	0	2,98	1	–3,83
	c_3	0	–6,02	–4,52	2,99	–5,21	0	0,01
	c_4	–6,01	1,00	–1,11	–5,21	0	0	0
	c_5	0	1,40	0	0	0	0	2,42
	c_6	3,23	3,23	3,23	3,22	3,23	0	0
F_0	d_1	0	0	0	0	0	0	–1,08
	d_2	–1,70	–1,53	–1,53	0	–1,34	–0,45	1,72
	d_3	0	2,71	2,03	–1,34	2,34	0	0
	d_4	2,70	0,45	0,50	2,34	0	0	0
	d_5	0	–0,63	0	0	0	0	–1,08
	d_6	0	0	0	0	0	1,45	1,44
A_0	e_1	0	0	0	0	0	0	–1,69
	e_2	–7,93	–2,38	–2,39	1,55	–2,09	–0,70	2,69
	e_3	4,74	4,22	1,06	–4,22	3,65	0	0
	e_4	4,19	2,09	2,33	3,67	1,39	0	0
	e_5	0	–2,93	0	0	–1,95	1,70	0
	e_6	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		64	65	66	67	68	69	70
		C_2S C_2F C_4AF CF MF F'F	C_2S C_4AF CF MA MF F'F	C_2S C_4AF CF CA MA F'F	C_2S CA CF CF_2 MA F'F	C_2S CF CF_2 MA MF F'F	C_2S F' CA MA F'A F'F	C_2S C_2AS CA MA F'A F'F
S_0	k_1	2,87	2,87	2,86	2,86	2,86	2,86	–2,86
	k_2	–9,02	–8,10	–8,12	0	–14,30	–2,38	9,13
	k_3	0	7,19	3,60	–14,30	12,44	–5,25	–5,27
	k_4	7,16	2,38	2,66	12,44	0	0	0
	k_5	0	–3,34	0	0	0	5,77	0
	k_6	0	0	0	0	0	0	0

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		71	72	73	74	75	76	77
		C_2S C_2AS CA CF_2 MA F'F	C_2S C_2AS CF_2 MF F'F F	C_2S C_2AS CF_2 MA MF F'F	C_2S C_3S_2 C_2MS_2 C_2AS F'F F	C_2S C_3S_2 C_2AS C_2MS_2 $C_2F'S_2$ F'F	C_3S_2 CS C_2AS C_2MS_2 F'F F	C_3S_2 CS C_2AS C_2MS_2 $C_2F'S_2$ F'F
C_0	a_1	3,07	0	6,21	6,13	6,13	5,17	5,17
	a_2	–4,89	0	–9,89	–5,13	–5,13	–4,17	–4,17
	a_3	2,82	6,71	6,74	0	0	0	0
	a_4	0	0	5,13	0	0	0	0
	a_5	0	0	–7,19	0	0	0	0
	a_6	0	–5,71	0	0	0	0	0
M_0	b_1	4,28	0	4,29	8,52	8,52	0,03	0,03
	b_2	–6,82	0	–6,84	–14,27	–14,27	–5,79	–5,79
	b_3	0,01	0	0,02	6,75	0	0	0
	b_4	0	4,95	3,55	0	6,75	6,76	6,76
	b_5	3,53	0	–0,02	0	0	0	0
	b_6	0	–3,95	0	0	0	0	0
F_0'	c_1	1,19	0	2,42	0	4,76	0	0
	c_2	–1,91	0	–3,86	0	–7,99	0	–3,24
	c_3	1,10	0	0,01	0	0	0	0
	c_4	–2,61	0	2,00	0	0	0	0
	c_5	0	3,23	–2,80	3,23	4,23	3,23	4,24
	c_6	3,23	–2,23	3,23	–2,23	0	–2,23	0
F_0	d_1	–0,54	0	–1,09	0	–2,14	0	0
	d_2	0,86	0	1,73	0	3,59	0	1,45
	d_3	–0,49	0	–0,01	0	0	0	0
	d_4	1,17	0	–0,90	0	0	0	0
	d_5	0	0	1,26	0	–1,90	0	–1,90
	d_6	0	1	0	1	1,44	1	1,45
A_0	e_1	–1,69	–1,69	–1,69	–1,69	–1,69	–2,84	–2,84
	e_2	2,69	2,69	2,70	0	0	1,15	1,15
	e_3	0	0	–0,01	0	2,69	2,69	2,69
	e_4	0	0	–0,01	2,69	0	0	0
	e_5	0	0	0,01	0	0	0	0
	e_6	0	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		71	72	73	74	75	76	77
		C_2S C_2AS CA CF_2 MA F'F	C_2S C_2AS CF_2 MF F'F F	C_2S C_2AS CF_2 MA MF F'F	C_2S C_3S_2 C_2MS_2 C_2AS F'F F	C_2S C_3S_2 C_2AS C_2MS_2 $C_2F'S_2$ F'F	C_3S_2 CS C_2AS C_2MS_2 F'F F	C_3S_2 CS C_2AS C_2MS_2 $C_2F'S_2$ F'F
S_0	k_1	–2,86	2,86	–8,72	–8,57	–8,57	–4,83	–4,83
	k_2	9,13	0	18,46	9,57	9,57	5,83	5,83
	k_3	–5,27	–12,51	–12,58	0	0	0	0
	k_4	0	0	–9,58	0	0	0	0
	k_5	0	0	13,42	0	0	0	0
	k_6	0	10,65	0	0	0	0	0

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		78	79	80	81	82	83	84
		CS C_2AS C_2MS_2 CAS_2 F'F F	CS C_2AS C_2MS_2 $C_2F'S_2$ CAS_2 F'F	CS CMS_2 C_2MS_2 CAS_2 F'F F	CS CMS_2 $CF'S_2$ C_2MS_2 CAS_2 F'F	CS $CF'S_2$ C_2MS_2 $C_2F'S_2$ CAS_2 F'F	C_2MS_2 C_2AS CAS_2 MA F'F F	C_2MS_2 CMS_2 CAS_2 MF F'F F
C_0	a_1	1,04	1,04	0	0	–0,01	0,70	–7111
	a_2	2,44	2,44	–3,87	–3,87	–4,42	2,79	8166
	a_3	0	0	4,87	0	0	–2,13	0
	a_4	–2,48	0	0	4,87	5,43	–0,36	–5221
	a_5	0	–2,48	0	0	0	0	0
	a_6	0	0	0	0	0	0	4167
M_0	b_1	–5,76	–5,76	–5,76	–5,76	–5,76	2,90	0
	b_2	0,02	0,02	–0,03	–0,03	–0,03	–1,94	0
	b_3	6,76	6,76	6,79	0	6,76	–1,98	0
	b_4	–0,02	0	0	6,79	0,03	2,02	4,95
	b_5	0	–0,02	0	0	0	0	0
	b_6	0	0	0	0	0	0	–3,95
F_0'	c_1	0	–3,24	0	–3,22	–3,24	0	0
	c_2	0	0	0	–3,02	0	0	0
	c_3	0	0	0	3,45	0	0	0
	c_4	0	4,24	0	3,79	4,24	0	0
	c_5	3,23	0	3,23	0	0	3,23	3,23
	c_6	–2,23	0	–2,23	0	0	–2,23	–2,23
F_0	d_1	0	1,45	0	1,45	1,45	0	0
	d_2	0	0	0	1,36	0	0	0
	d_3	0	0	0	–1,55	0	0	0
	d_4	0	–1,90	0	–1,71	–1,90	0	0
	d_5	0	0	0	0	0	0	0
	d_6	1	1,45	1	1,45	1,45	1	1
A_0	e_1	–1,71	–1,71	–2,28	–2,28	–2,29	–1,14	–3900
	e_2	1,35	1,35	–2,13	–2,13	–2,43	0,76	4476
	e_3	0	0	2,68	0	0	0,78	3,00
	e_4	1,36	0	2,73	2,68	2,99	0,60	–2860
	e_5	0	1,36	0	2,73	2,73	0	0
	e_6	0	0	0	0	0	0	2282

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		78	79	80	81	82	83	84
		CS C_2AS C_2MS_2 CAS_2 F'F F	CS C_2AS C_2MS_2 $C_2F'S_2$ CAS_2 F'F	CS CMS_2 C_2MS_2 CAS_2 F'F F	CS CMS_2 $CF'S_2$ C_2MS_2 CAS_2 F'F	CS $CF'S_2$ C_2MS_2 $C_2F'S_2$ CAS_2 F'F	C_2MS_2 C_2AS CAS_2 MA F'F F	C_2MS_2 CMS_2 CAS_2 MF F'F F
S_0	k_1	0,96	0,96	1,93	1,93	1,94	0,64	6629
	k_2	–2,28	–2,28	3,62	3,62	4,13	–1,95	–7611
	k_3	0	0	–4,55	0	0	2,65	0
	k_4	2,32	0	0	–4,55	–5,07	–0,34	4863
	k_5	0	2,32	0	0	0	0	0
	k_6	0	0	0	0	0	0	–3880

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		85	86	87	88	89	90	91
		C_2MS_2 $C_2F'S_2$ C_2AS CAS_2 F'A F'F	C_2MS_2 C_2AS CAS_2 MA F'A F'F	C_2MS_2 C_2AS MA MF F'F F	C_2MS_2 $C_2F'S_2$ $CF'S_2$ CAS_2 F'A F'F	C_2MS_2 CMS_2 CAS_2 MA F'A F'F	C_2MS_2 CMS_2 $CF'S_2$ CAS_2 F'A F'F	C_2MS_2 CMS_2 MA MF F'F F
C_0	a_1	0	0,69	–2,42	0	4,87	4,87	4,87
	a_2	0,78	2,80	4,88	5,42	–3,87	–3,87	–3,87
	a_3	2,79	–2,13	–2,53	–4,42	0	0	0
	a_4	–2,13	–0,36	5,32	0	0	0	0
	a_5	–0,44	0	0	0	0	0	0
	a_6	0	0	–4,25	0	0	0	0
M_0	b_1	6,76	2,90	0	6,76	0,01	0,01	4,95
	b_2	–4,30	–1,94	0	–7,50	2,69	5,37	0
	b_3	–1,93	–1,98	0	3,04	–3,46	–3,08	–3,95
	b_4	–1,99	2,02	4,95	–3,45	1,76	–3,46	0
	b_5	2,46	0	0	2,15	0	2,16	0
	b_6	0	0	–3,95	0	0	0	0
F_0'	c_1	0	1,63	0	0	0	0	0
	c_2	1,82	–1,09	0	0	1,51	0	0
	c_3	–1,09	–1,11	0	1,73	–1,94	1,73	0
	c_4	–1,11	0,85	0	–1,94	–0,99	–1,94	0
	c_5	1,38	2,42	3,23	1,21	2,42	1,21	3,23
	c_6	0	0	–2,23	0	0	0	–2,23
F_0	d_1	0	–0,73	0	0	0	0	0
	d_2	–0,82	0,49	0	0	–0,68	0	0
	d_3	0,49	0,50	0	–0,78	0,87	–0,78	0
	d_4	0,50	0,38	0	0,87	0,45	0,87	0
	d_5	–0,62	–1,09	0	–0,54	–1,09	–0,54	0
	d_6	1,45	1,45	1	1,45	1,45	1,45	1
A_0	e_1	0	–1,14	0	0	0	0	0
	e_2	–1,28	0,76	0	0	–1,06	0	0
	e_3	0,77	0,78	1,39	–1,21	1,36	–1,21	1,39
	e_4	0,78	0,60	–1,95	1,36	0,70	1,36	–1,95
	e_5	0,73	0	0	0,85	0	0,85	0
	e_6	0	0	1,56	0	0	0	1,56

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		85	86	87	88	89	90	91
		C_2MS_2 $C_2F'S_2$ C_2AS CAS_2 F'A F'F	C_2MS_2 C_2AS CAS_2 MA F'A F'F	C_2MS_2 C_2AS MA MF F'F F	C_2MS_2 $C_2F'S_2$ $CF'S_2$ CAS_2 F'A F'F	C_2MS_2 CMS_2 CAS_2 MA F'A F'F	C_2MS_2 CMS_2 $CF'S_2$ CAS_2 F'A F'F	C_2MS_2 CMS_2 MA MF F'F F
S_0	k_1	0	0,64	4,53	0	–2,28	–2,28	–2,27
	k_2	0,72	–1,96	–4,55	–2,53	2,71	1,81	3,61
	k_3	–1,96	2,65	2,36	3,09	1,16	1,03	0
	k_4	2,65	–0,33	–6,62	1,16	–0,59	1,16	–1,66
	k_5	–0,41	0	0	–0,72	0	–0,72	0
	k_6	0	0	5,28	0	0	0	1,32

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		92	93	94	95	96	97	98
		C_2MS_2 CMS_2 CAS_2 MA MF F'F	C_2AS CA CA_2 CF_2 MA F'F	C_2AS CA CA_2 MA F'A F'F	C_2AS CA_2 CF_2 MA F'F F	C_2AS CF_2 MA MF F'F F	C_2AS CA_2 CA_6 MA F'F F	C_2AS CA_2 CA_6 MA F'A F'F
C_0	a_1	4,87	0	0	0	0	0	0
	a_2	–3,87	5,64	5,64	0	6,71	3,38	3,38
	a_3	0	–4,64	–4,64	6,71	0	–2,38	–2,38
	a_4	0	0	0	0	0	0	0
	a_5	0	0	0	0	0	0	0
	a_6	0	0	0	–5,71	–5,71	0	0
M_0	b_1	0,01	0	0	0	0	0	0
	b_2	2,69	3,94	3,94	–3,23	0	0,79	0,79
	b_3	–3,46	–6,47	–6,47	4,68	0	–3,32	–3,32
	b_4	1,76	0	3,53	3,53	4,95	3,53	3,53
	b_5	0	3,53	0	0	0	0	0
	b_6	0	0	0	–3,98	–3,95	0	0
F_0'	c_1	0	0	0	0	0	0	0
	c_2	1,51	2,20	2,21	0	0	0	–0,98
	c_3	–1,94	–1,81	–3,63	0	0	0	4,14
	c_4	0,99	–2,62	0	0	0	0	0
	c_5	–2,79	0	2,42	3,23	3,23	3,23	–5,39
	c_6	3,23	3,23	0	–2,23	–2,23	–2,23	3,23
F_0	d_1	0	0	0	0	0	0	0
	d_2	–0,68	–0,99	–0,99	0	0	0	0,44
	d_3	0,88	0,81	1,63	0	0	0	–1,86
	d_4	–0,45	1,18	0	0	0	0	0
	d_5	1,25	0	–1,09	0	0	0	2,42
	d_6	0	0	1,45	1	1	1	0
A_0	e_1	0	0	0	0	0	0	0
	e_2	–1,06	–1,55	–1,55	1,28	0	–0,31	–0,31
	e_3	1,36	2,55	2,55	–1,85	1,39	1,31	1,31
	e_4	0,70	0	0	0	–1,95	0	0
	e_5	0	0	0	0	0	0	0
	e_6	0	0	0	1,57	1,56	0	0

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		92	93	94	95	96	97	98
		C_2MS_2 CMS_2 CAS_2 MA MF F'F	C_2AS CA CA_2 CF_2 MA F'F	C_2AS CA CA_2 MA F'A F'F	C_2AS CA_2 CF_2 MA F'F F	C_2AS CF_2 MA MF F'F F	C_2AS CA_2 CA_6 MA F'F F	C_2AS CA_2 CA_6 MA F'A F'F
S_0	k_1	–2,28	4,56	4,56	4,57	4,56	4,57	4,57
	k_2	2,71	–7,89	–7,89	–2,17	–12,53	–5,79	–5,79
	k_3	1,16	4,33	4,33	–9,39	–2,37	2,22	2,22
	k_4	–0,59	0	0	0	3,32	0	0
	k_5	0	0	0	0	0	0	0
	k_6	0	0	0	7,99	8,02	0	0

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		99	100	101	102	103	104	105
		C_2AS CAS_2 A MA F'F F	C_2AS CAS_2 A MA F'A F'F	C_2AS CA_6 MA F'A F'F A	C_2AS CA_6 MA F'F FA A	C_2AS CA_6 MA F'F FA F	CAS_2 $M_2A_2S_5$ MA MF F'F	A_3S_2 CAS_2 MA F'F FA F
C_0	a_1	3,26	3,26	0	0	0	4,95	–7,58
	a_2	–1,65	–1,65	11,90	11,90	11,90	–4,17	4,95
	a_3	–0,61	–0,61	0	0	0	–0,50	0
	a_4	0	0	0	0	0	3,55	0
	a_5	0	0	0	0	–27,96	0	9,31
	a_6	0	0	–10,90	–10,90	17,06	–2,83	–5,68
M_0	b_1	0	0	0	0	0	0	0
	b_2	0	0	0	0	0	0	0
	b_3	–2,53	–2,53	3,53	3,53	3,53	0	3,53
	b_4	3,53	3,53	0	0	0	4,95	0
	b_5	0	0	0	0	–6,49	0	–6,49
	b_6	0	0	–2,53	–2,53	3,96	–3,95	3,96
F_0'	c_1	0	0	0	3,23	0	0	0
	c_2	0	0	0	–3,65	0	0	0
	c_3	0	–1,42	0	1,42	0	0	0
	c_4	0	0	2,42	0	3,23	0	3,23
	c_5	3,23	2,42	0	0	0	3,23	0
	c_6	–2,23	0	–1,42	0	–2,23	–2,23	–2,23
F_0	d_1	0	0	0	0	0	0	0
	d_2	0	0	0	0	0	0	0
	d_3	0	0,64	0	0	0	0	0
	d_4	0	0	–1,09	0	0	0	0
	d_5	0	–1,09	1,45	1,64	0	0	0
	d_6	1	1,45	0,64	–0,64	1	1	1
A_0	e_1	0	0	0	0	0	0	0
	e_2	0	0	0	0	0	0	0
	e_3	1	1	0	0	0	1,39	0
	e_4	0	0	0	0	0	–1,95	0
	e_5	0	0	0	0	2,56	0	2,56
	e_6	0	0	1	1	–1,56	1,56	–1,56

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		99	100	101	102	103	104	105
		C_2AS CAS_2 A MA F'F F	C_2AS CAS_2 A MA F'A F'F	C_2AS CA_6 MA F'A F'F A	C_2AS CA_6 MA F'F FA A	C_2AS CA_6 MA F'F FA F	CAS_2 $M_2A_2S_5$ MA MF F'F	A_3S_2 CAS_2 MA F'F FA F
S_0	k_1	–1,52	–1,52	4,56	4,56	4,56	0	3,55
	k_2	3,08	3,08	–22,23	–22,23	–22,23	1,95	0
	k_3	–0,56	–0,56	0	0	0	–0,95	0
	k_4	0	0	0	0	0	0	0
	k_5	0	0	0	0	47,86	0	–6,53
	k_6	0	0	18,67	18,67	–29,19	0	3,98

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		106	107	108	109	110	111	112
		A_3S_2 CAS_2 MA F'F FA A	A_3S_2 CAS_2 MA F'A F'F A	A_3S_2 CAS_2 $M_2A_2S_5$ $F_2'A_2S_5$ F'A F'F	A_3S_2 CAS_2 $M_4A_2S_5$ MA F'F F	A_3S_2 CAS_2 $M_4A_2S_5$ MA F'A F'F	A_3S_2 CAS_2 $M_4A_2S_5$ $M_2A_2S_5$ F'F F	A_3S_2 CAS_2 $M_4A_2S_5$ $M_2A_2S_5$ F'A F'F
C_0	a_1	–7,58	–7,58	–3,06	–0,05	–0,05	–2,91	–2,91
	a_2	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95	4,95
	a_3	0	0	–2,48	–13,98	–13,98	2,17	2,17
	a_4	0	0	2,70	10,08	10,08	–3,21	–3,21
	a_5	0	0	0,83	0	0	0	0
	a_6	3,63	3,63	–1,94	0	0	0	0
M_0	b_1	0	0	–4,55	–5,26	–5,26	–4,26	–4,26
	b_2	0	0	0	0	0	0	0
	b_3	3,53	3,53	2,50	9,75	9,75	4,15	4,15
	b_4	0	0	5,16	–3,49	–3,49	1,11	1,11
	b_5	0	0	1,58	0	0	0	0
	b_6	–2,53	–2,53	–3,69	0	0	0	0
F_0'	c_1	0	0	–7,13	0	–2,95	0	–1,83
	c_2	0	0	0	0	0	0	0
	c_3	0	0	3,92	0	5,47	0	–0,85
	c_4	3,23	2,42	8,09	0	–3,94	0	1,26
	c_5	–3,65	0	–1,31	3,23	2,42	3,23	2,42
	c_6	1,42	–1,42	–2,57	–2,23	0	–2,23	0
F_0	d_1	0	0	3,20	0	1,32	0	0,82
	d_2	0	0	0	0	0	0	0
	d_3	0	0	–1,76	0	–2,46	0	0,38
	d_4	0	–1,08	–3,63	0	1,77	0	–0,56
	d_5	1,64	1,45	0,59	0	–1,08	0	–1,09
	d_6	–0,64	0,64	2,60	1	1,45	1	1,45
A_0	e_1	0	0	1,24	2,07	2,07	1,28	1,28
	e_2	0	0	0	0	0	0	0
	e_3	0	0	–0,68	–3,84	–3,84	0,60	0,60
	e_4	0	0	0,74	2,77	2,77	–0,88	–0,88
	e_5	0	0	0,23	0	0	0	0
	e_6	1	1	–0,53	0	0	0	0

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		106	107	108	109	110	111	112
		A_3S_2 CAS_2 MA F'F FA A	A_3S_2 CAS_2 MA F'A F'F A	A_3S_2 CAS_2 $M_2A_2S_5$ $F_2'A_2S_5$ F'A F'F	A_3S_2 CAS_2 $M_4A_2S_5$ MA F'F F	A_3S_2 CAS_2 $M_4A_2S_5$ MA F'A F'F	A_3S_2 CAS_2 $M_4A_2S_5$ $M_2A_2S_5$ F'F F	A_3S_2 CAS_2 $M_4A_2S_5$ $M_2A_2S_5$ F'A F'F
S_0	k_1	3,55	3,55	0,37	–1,73	–1,73	0,27	0,27
	k_2	0	0	0	0	0	0	0
	k_3	0	0	1,74	9,79	9,79	–1,52	–1,52
	k_4	0	0	–1,89	–7,06	–7,06	2,25	2,25
	k_5	0	0	–0,58	0	0	0	0
	k_6	–2,55	–2,55	1,36	0	0	0	0

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		113	114	115	116	117	118	119
		CAS_2 $M_2A_2S_5$ $M_4A_2S_5$ MA F'F F	CAS_2 $M_2A_2S_5$ $M_4A_2S_5$ MA F'A F'F	MS $M_2A_2S_5$ CAS_2 MF F'F F	MS CMS_2 CAS_2 MF F'F F	A_3S_2 CAS_2 $M_2A_2S_5$ F'F F S	A_3S_2 CAS_2 $M_2A_2S_5$ $F_2'A_2S_5$ F'F S	MS $M_2A_2S_5$ CAS_2 F'F F S
C_0	a_1	4,95	4,95	0,87	–3,58	–2,52	–2,52	1,78
	a_2	0,05	0,05	–5,19	3,86	4,95	4,95	–5,19
	a_3	–14,25	–14,25	4,95	0	0	0	4,95
	a_4	10,24	10,24	1,80	3,58	0	0	0
	a_5	0	0	0	0	0	0	0
	a_6	0	0	–1,43	–2,85	–1,43	–1,43	–0,54
M_0	b_1	0	0	0	0	–3,52	–3,52	2,48
	b_2	5,89	5,89	0	0	0	0	0
	b_3	–19,89	–19,89	0	0	7,24	7,24	0
	b_4	15,00	15,00	4,95	4,95	0	0	0
	b_5	0	0	0	0	0	0	0
	b_6	0	0	–3,95	–3,95	–2,72	–2,72	–1,48
F_0'	c_1	0	0	0	0	0	–1,97	0
	c_2	0	3,31	0	0	0	0	0
	c_3	0	–11,16	0	0	0	0	0
	c_4	0	6,43	0	0	3,23	4,50	3,23
	c_5	3,23	2,42	3,23	3,23	–2,23	0	–2,23
	c_6	–2,23	0	–2,23	–2,23	0	–1,53	0
F_0	d_1	0	0	0	0	0	0,88	0
	d_2	0	–1,48	0	0	0	0	0
	d_3	0	5,01	0	0	0	0	0
	d_4	0	–2,89	0	0	0	–2,02	0
	d_5	0	–1,09	0	0	1	1,45	1
	d_6	1	1,45	1	1	0	0,69	0
A_0	e_1	0	0	–2,46	0	1,39	1,39	–0,98
	e_2	–2,32	–2,32	2,87	–2,13	0	0	2,86
	e_3	7,85	7,85	0	2,73	0	0	0
	e_4	–4,53	–4,53	3,93	1,95	0	0	0
	e_5	0	0	0	0	0	0	0
	e_6	0	0	–2,34	–1,56	–0,39	–0,39	–0,88

Продолжение табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		113	114	115	116	117	118	119
		CAS_2 $M_2A_2S_5$ $M_4A_2S_5$ MA F'F F	CAS_2 $M_2A_2S_5$ $M_4A_2S_5$ MA F'A F'F	MS $M_2A_2S_5$ CAS_2 MF F'F F	MS CMS_2 CAS_2 MF F'F F	A_3S_2 CAS_2 $M_2A_2S_5$ F'F F S	A_3S_2 CAS_2 $M_2A_2S_5$ $F_2'A_2S_5$ F'F S	MS $M_2A_2S_5$ CAS_2 F'F F S
S_0	k_1	0	0	1,67	1,67	0	0	0
	k_2	1,95	1,95	0	0	0	0	0
	k_3	0	0	0	0	0	0	0
	k_4	–0,95	–0,95	–3,33	–3,33	0	0	0
	k_5	0	0	0	0	0	0	0
	k_6	0	0	2,66	2,66	1	1	1

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		120	121	122	123	124	125	126
		MS F'S $M_2A_2S_5$ CAS_2 F'F S	MS CMS_2 CAS_2 F'F F S	MS F'S CMS_2 CAS_2 F'F S	F'S $M_2A_2S_5$ $F_2'A_2S_5$ CAS_2 F'F S	CS CMS_2 CAS_2 F'F F S	F'S CMS_2 $CF'S_2$ CAS_2 F'F S	CS CMS_2 $CF'S_2$ CAS_2 F'F S
C_0	a_1	1,78	–1,79	–1,79	2,35	2,07	–2,35	2,07
	a_2	0	3,86	0	0	0	0	0
	a_3	–5,19	0	3,86	–5,77	0	4,42	0
	a_4	4,95	0	0	4,95	0	0	0
	a_5	0	0	0	0	0	0	0
	a_6	–0,54	–1,07	–1,07	–0,53	–1,07	–1,07	–1,07
M_0	b_1	2,49	2,49	2,49	3,28	–2,88	3,28	–2,88
	b_2	0	0	0	7,24	5,37	5,37	5,37
	b_3	0	0	0	–8,05	0	–6,16	0
	b_4	0	0	0	0	0	0	0
	b_5	0	0	0	0	0	0	0
	b_6	–1,49	–1,49	–1,49	–1,47	–1,49	–1,49	–1,49
F_0'	c_1	0	0	0	1,83	0	1,83	–1,61
	c_2	1,83	0	1,83	0	0	0	0
	c_3	0	0	0	0	0	0	3,44
	c_4	0	3,23	0	0	3,23	0	0
	c_5	0	–2,23	0	0	–2,23	0	0
	c_6	–0,83	0	–0,83	–0,83	0	–0,83	–0,83
F_0	d_1	0	0	0	–0,82	0	–0,82	0,72
	d_2	–0,82	0	–0,82	0	0	0	0
	d_3	0	0	0	0	0	0	–1,55
	d_4	0	0	0	0	0	0	0
	d_5	1,45	1	1,45	1,45	1	1,45	1,45
	d_6	0,37	0	0,37	0,37	0	0,37	0,38
A_0	e_1	–0,98	0,99	0,98	–1,30	–1,14	1,30	–1,14
	e_2	0	–2,13	0	0	0	0	0
	e_3	2,86	2,73	–2,13	3,18	2,73	–2,44	0
	e_4	0	0	2,73	0	0	2,73	2,73
	e_5	0	0	0	0	0	0	0
	e_6	–0,88	–0,59	–0,58	–0,88	–0,59	–0,59	–0,59

Окончание табл. 2

Исходные компоненты	Коэффициенты	Гексатопы						
		120	121	122	123	124	125	126
		MS F'S $M_2A_2S_5$ CAS_2 F'F S	MS CMS_2 CAS_2 F'F F S	MS F'S CMS_2 CAS_2 F'F S	F'S $M_2A_2S_5$ $F_2'A_2S_5$ CAS_2 F'F S	CS CMS_2 CAS_2 F'F F S	F'S CMS_2 $CF'S_2$ CAS_2 F'F S	CS CMS_2 $CF'S_2$ CAS_2 F'F S
S_0	k_1	0	0	0	0	0	0	0
	k_2	0	0	0	0	0	0	0
	k_3	0	0	0	0	0	0	0
	k_4	0	0	0	0	0	0	0
	k_5	0	0	0	0	0	0	0
	k_6	1	1	1	1	1	1	1

Их можно использовать для расчета фазового состава шлаков, клинкера и других материалов по известному их химическому составу. Эти составы надо подставлять в каждый из 126 гексатопов. Признаком принадлежности данного изделия (шлака, клинкера) к конкретному политопу является положительное значение численных значений фаз, в сумме дающих 100%. Ручной способ поиска такого политопа среди 126 возможных сложен. По этой причине по известным уравнениям (моделям), приведенным в таблице 2, создана компьютерная программа. Она, после задания с пульта химического состава материала, в автоматическом режиме ведет поиск искомого политопа, выполняет расчет и выдает на монитор (или печать) его фазовый состав в массовых процента. Покажем возможности метода на нескольких примерах.

4. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА

4.1. Железорудные окатыши и агломераты

При их производстве одной из основных является задача формирования оптимального по своим свойствам состава связки — главного носителя прочности сырья. По данным [9] связка окатышей основностью (CaO/SiO_2) 1 из железистых кварцитов содержит, масс.%: 37,5 CaO, 42,5 SiO_2 и 20 Fe_2O_3. После задачи этого состава с пульта, компьютер подставляет его в каждый из 126 гексатопов и находит, что связка данного состава принадлежит гексатопу №124 (таблица 2) CS–CMS2–CAS_2-F'F–F–S. Поскольку по химическому анализу в связке нет MgO, Al_2O_3 и FeO, то она будет иметь следующие фазы: CS–F–S, т.е. $CaO{\cdot}SiO_2$–Fe_2O_3–SiO_2. В соответствии с данными таблицы 2 компьютер ведет расчет так:

$$CS = a_1C_0 + d_1F_0 + k_1S_0 = 2{,}07.37{,}5 + 0.20 + 0.42{,}5 = 77{,}6$$
$$F = a_5C_0 + d_5F_0 + k5S0 = 0.37{,}5 + 1.20 + 0.42{,}5 = 20{,}0$$
$$S = a_6C_0 + d_6F_0 + k_6S_0 = -1{,}07.37{,}5 + 0.20 + 1.42{,}5 = 2{,}4,$$

т.е. связка будет содержать 77,6% волластонита, 20% гематита и 2,4% тридимита. Эти данные выдаются на монитор.

При агломерации железных руд направление минералообразования определяется преимущественно наличием FeO, появляющейся в результате снижения окислительного потенциала газовой фазы из-за горения твердого топлива шихты. Поэтому для оценки фазообразования при агломерации существующих на заводах шихт необходимо использовать полную фазовую диаграмму шестикомпонентной системы CaO–MgO–SiO_2–Al_2O_3–FeO–Fe_2O_3.

Приведенные в таблице 2 уравнения могут быть использованы не только для прогноза фазообразования, но и целенаправленного подбора связки окатышей и агломератов, т.е. решения обратной задачи. Это оказывается возможным, если воспользоваться исходными балансовыми уравнениями,

которые приведены в компьютерной программе. Так, если при агломерации ставится задача получения высокопрочной связки на основе ферромонтичеллита, то имеется, по крайней мере, четыре заслуживающих внимания варианта её реализации, отображаемые четырьмя фазовыми политопами. В таблице 2 они значатся под №№ 35; 41; 61 и 62. Так, для политопа № 61 балансовые уравнения выглядят следующим образом: $CaO = 0{,}651C_2S + 0{,}298CF'S$; $SiO_2 = 0{,}32CF'S + 0{,}349C_2S$ и $FeO = F' + 0{,}382CF'S$. Для получения связки, на 100% состоящей из ферромонтичеллита (CF'S), она должна содержать, масс,%: $CaO = 0{,}651.0 + 0{,}298.100 = 29{,}8$; $SiO_2 = 0{,}32.100 + 0{,}349.0 = 32{,}0$ и $FeO = 0 + 0{,}382.100 = 38{,}2$. При заданном составе железорудного концентрата достигается это подшихтовкой флюсов и топлива. Разумеется, что можно задаваться любым соотношением приведенных фаз для достижения поставленных целей.

4.2. Производство углеродистого феррохрома

Изменение состава добываемых на Донском ГОКе (Казахстан) хромитовых руд в сторону роста в них оксида магния привело к ухудшению показателей их переработки в рудно-термических печах. По имеющимся данным во многом это связано с изменением состава и свойств шлаков [10, 11].

При практически неизменном количестве в шлаках кремнезема (33,59–35,45%) содержание в них глинозема упало с 26,1–28,77 до 17,22%, а оксида магния выросло с 28,0–31,71 до 44,88%. Отношение оксида магния к глинозему при этом поднялось с 1,04–1,1 до 2,6. Компьютерный расчет с использование приведенной в таблице 2 модели показал (таблица 3), что шлаки по этой причине переместились из области магнезильной шпинели ($MgO{\cdot}Al_2O_3$) в область преимущественной кристаллизации форстерита ($2MgO{\cdot}SiO_2$), вызвав ухудшение показателей работы рудно-термических печей.

Таблица 3. Состав шлаков углеродистого феррохрома, %

№	Годы	Химический состав, %			Фазовый состав, %		
		SiO_2	Al_2O_3	MgO	$MgO{\cdot}Al_2O_3$	SiO_2	$2MgO{\cdot}SiO_2$
1	1942–1945	39,5	29,0	31,5	40,4	24,6	35,0
2	1950–1952	32,7	28,5	38,8	39,8	12,2	47,9
3	1960–1963	34,9	23,9	41,2	33,4	11,2	55,4
4	1968–1969	33,4	21,9	44,7	30,6	6,5	62,9
5	1987–2000	35,1	18,0	46,9	25,0	5,0	70,0

Ввод в печи по нашему предложению легкоплавкой боратовой руды улучшил их работу [12,13].

4.3. Производство цементного клинкера

Разработанная программа за редким исключением может рассчитать фазовый состав практически любого клинкера: белого портландцементного, глиноземистого, магнезиального, шлакопортландцементного и ряда других. Для этого в программу с пульта компьютера надо ввести химический состав (приведенного к 100%) проектируемого к производству клинкера и дать старт расчету. Фазовый состав будет выдан в массовых процентах. Допустим, технологами к спеканию подготовлена шихта следующего состава (масс.%): 66,68 CaO, 21,45 SiO_2, 6,83 Al_2O_3 и 5,04 Fe_2O_3. Требуется определить фазовый состав получаемого из этой шихты клинкера. Расчет показывает, что после спекания шихты клинкер будет иметь следующие фазы (масс.%): 55,44 трехкальциевого силиката ($3CaO{\cdot}SiO_2$), 19,68 двухкальциевого силиката ($2CaO{\cdot}SiO_2$), 9,57 трехкальциевого алюмината ($3\ CaO{\cdot}Al_2O_3$) и 15,31 четырехкальциевого алюмоферрита ($4\ CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}Fe_2O_3$). По имеющимся данным [14], такой клинкер может быть использован для производства высокопрочного быстротвердеющего портландцемента марки 800.

Как уже указывалось, предложенные модели удобны для решения и обратной задачи — расчета шихты для получения клинкера определенного фазового состава. Рекомендуется, например, в белом портландцементном клинкере иметь 45% $3CaO{\cdot}SiO_2$, 38% $2CaO{\cdot}SiO_2$ и 17% $3CaO{\cdot}Al_2O_3$ [14]. Из таблицы 2 или компьютерной программы можно видеть, что эти фазы имеются в гексатопах № 4 и № 5,

а исходные балансовые уравнения в них для расчета требуемого количества CaO (C), SiO_2 (S) и Al_2O_3 (A) одинаковы и имеют вид:

$$C = +0{,}737 \cdot C3S + 0.65 \cdot C_2S + 0{,}622 \cdot C_3A$$
$$S = +0{,}263 \cdot C_3S + 0{,}349 \cdot C_2S$$
$$A = +0{,}378 \cdot C_3A$$

Расчет по ним показывает, что для получения клинкера с указанным выше фазовым составом в шихте необходимо иметь:

CaO (C) = 68,48%; SiO_2 (S) = 25,10% и Al_2O_3 (A) = 6,43%.

Зная химические анализы имеющихся на предприятии известняка, кварцита и глинозема, можно установить их расходы в шихту.

4.4. Ваграночные шлаки

При безфлюсовой плавке состав ваграночного шлака может быть охарактеризован следующими данными (масс.%): 6,6 CaO, 59,2 SiO_2, 12,0 Al_2O_3 и 22,1 FeO. Расчет с использованием программы показывает присутствие в нем таких фаз (мас.%): 40,3 силиката железа (F/S), 0,50 геденбергита (CF/S_2), 32,7 анортита(CAS_2) и 26,5 тридимита (S). Переход на флюсовую плавку с присадкой известняка приводит к образованию более основного шлака (масс.%): 35,3 CaO, 49,2 SiO_2, 11,3 Al_2O_3 и 4,2 FeO. В этом случае шлак по фазовому составу перемещается из области силиката железа в область преимущественной кристаллизации волластонита (CS–$CaO \cdot SiO_2$): 53,5 CS, 14,5 CF/S_2, 30,7 CAS_2 и 1,30 S. Количество тридимита (S) в шлаке падает с 26,5 до 1,30% в результате связывания его присаженным оксидом кальция в волластонит. Появление тугоплавкого волластонита позволяет вести плавку на более высоком температурном уровне для надлежащего прогрева чугуна, а снижение в шлаке концентрации тридимита с каркасного строением аниона — иметь хорошо текучие шлаки, которые не загромождают горн (копильник), летку и хорошо выбиваются при остановке вагранки.

4.5. Сталеплавильные шлаки

Ковшевые шлаки выплавки стали в ДСП можно характеризовать следующими усредненными данными (масс.%): 63,3 CaO, 25,9 SiO_2, 1,3 Al_2O_3, 7,5 MgO, 2,0 FeO. Визуально можно отметить высокое содержание оксида кальция, более чем двухкратно меньшую концентрацию кремнезема, недостаточную раскисленность шлака (по содержанию оксида железа) для успешного удаления серы. Расчет фазового состава этого шлака дает дополнительную важную информацию (масс.%): 52,1 $3CaO \cdot SiO_2$, 34,9 $2CaO \cdot SiO_2$, 3,5 $3CaO \cdot Al_2O_3$, 7,5 MgO и 2,0 FeO. Шлак насыщен оксидом магния, поскольку он выделился в виде свободного периклаза (MgO). Это способствует сохранности огнеупорной футеровки. Сумма трех и двухкальциевого силикатов составляет 87%, но отсутствует свободный CaO с высокой активностью к сере. Небольшое повышение основности для появления CaO привело бы к дальнейшему снижению серы в металле. В шлаке присутствует способный к полиморфным превращениям двхкальциевый силикат ($2CaO \cdot SiO_2$) и с большой уверенностью можно прогнозировать, что шлак на полигоне при охлаждении распадется, вызвав экологические проблемы. На рисунке 4 и 5 показаны окна компьютерной программы для рассматриваемого случая.

4.6. Каменное литьё

Брусчатка на Красной площади Москвы и улицах Нижнего Тагила служит дорожным покрытием десятилетиями без заметных признаков износа. Первая изготовлена из природного бутового камня, а вторая — искусственная. Она получена из доменных шлаков методом литья из расплавленного состояния. Многие павильоны ВДНХ облицованы плитками из цветного каменного литья, а предприятия медицины и пищевой отрасли по санитарно-гигиеническим требованиям используют белокаменное литье в обустройстве стен, полов, оборудования. В г. Никополь (Украина) из шлаков выплавки марган-

цевых ферросплавов методом литья получают фундаментные блоки, тротуарные плиты, балки перекрытия и другую продукцию длительного пользования.

В Казахстане на предприятиях Темиртау, Аксу, Павлодара, Балхаша, Жезказгана, Усть-Каменогорска и других имеются многомиллионные запасы техногенных отходов в виде шлаков, шламов, хвостов обогащения, которые могут быть использованы в этих целях. Неудачные попытки в этом направлении нередко обусловлены тем, что не учитываются требования к фазовому составу каменного литья. Оно должно формироваться из диопсида $CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2$. Монофазность изделия обеспечивает равномерность коэффициентов теплового расширения, тепло- и температуропроводности, износостойкости и других свойств материала. Являясь шпинелью, диопсид вбирает в свою решетку катионы других металлов (марганца, железа, например), позволяя использовать самое разнообразное сырьё и обеспечивая одновременно монофазность.

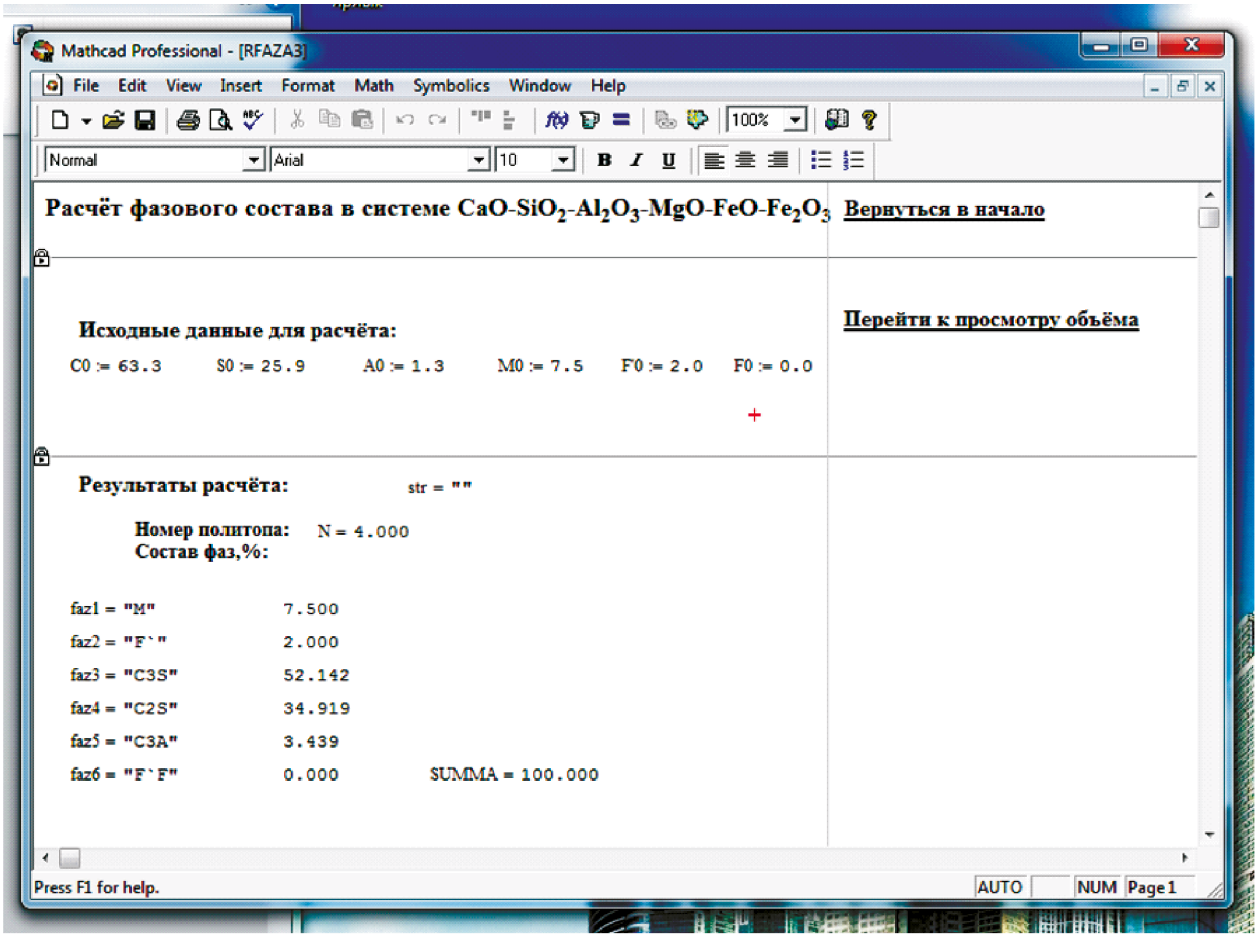


Рис. 4. Окно 1 компьютерной программы с результатами расчета

Единственным является требование обеспечивать в шихте присутствие 36% CaO, 26% MgO и 38% SiO_2. Примеров полезности учета фазового состава можно привести много. Опыт показывает востребованность подобного подхода для решения научных и практических задач [15–20].

Особое значение программа имеет для учебного процесса. В курсах металлургии, строительного дела, обогащения и других составы руд, шлаков, клинкеров характеризуют свободными основными, кислыми и амфотерными оксидами CaO, SiO_2, Al_2O_3 и др. Но в процессе пиро- и гидрометаллургической переработки взаимодействие основных и кислых оксидов дает соли, например, силикаты, алюминаты и другие. Эти фазы и определяют течение технологического процесса и качество получаемого изделия.

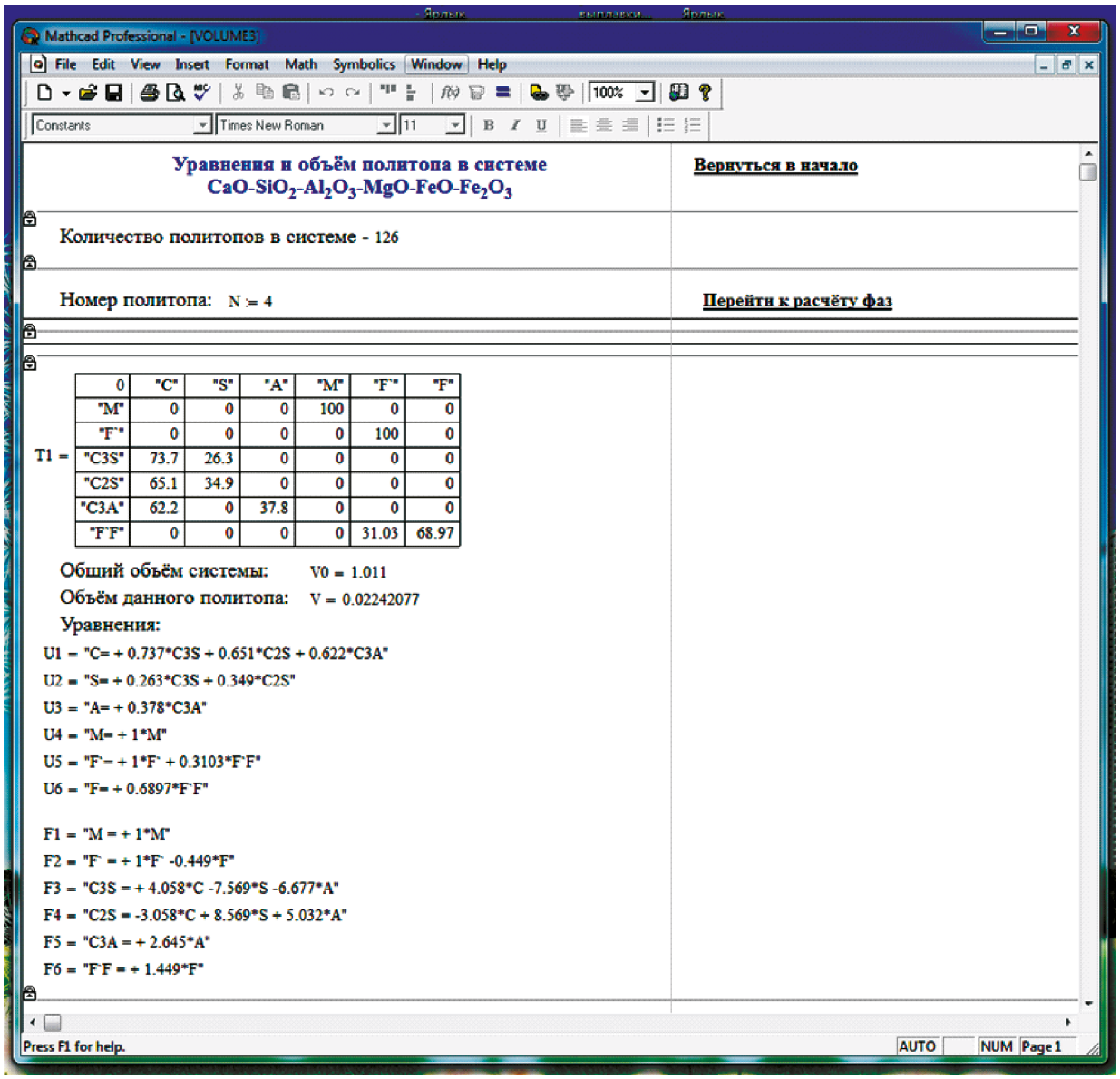


Рис. 5. Окно 2 компьютерной программы с исходными балансовыми и конечными расчетными уравнениями

Характеристика руд, шлаков, клинкера или керамики только как совокупность свободных оксидов противоречит теории кислот и оснований, не дает представления о происходящих между ними реакциях и о путях повышения качества изделий и процесса в целом. Одной из причин сложившегося положения в учебной, исследовательской и производственной деятельности является отсутствие простого и оперативного способа определения фазового состава производимого или намеченного к выпуску изделия. Предлагаемая программа восполняет этот пробел. Она основана на строгих термодинамических принципах образования фаз из исходных оксидов шихты. Алгоритм программы создан на основе разработанного авторами метода математического описания диаграмм фазового состава многокомпонентных систем. Программа проста в использовании, требует не более чем 2–3 часового обучения и может быть использована персоналом, знакомым с обычной работой компьютера.

Разработчики предлагают аналогичного характера компьютерные программы для расчета равновесного фазового состава в системах:

1. $CaO — MgO — FeO — Cr_2O_3 — Al_2O_3 — SiO_2$
2. $MgO — MnO — CaO — SiO_2 — Al_2O_3$
3. $CaO — SiO_2 — Al_2O_3 — BaO — FeO$
4. $SiO_2 — Al_2O_3 — CaO — MgO$
5. $CaO — SiO_2 — FeO — ZnO$
6. $CaO — SiO_2 — FeO — MnO$
7. $CaO — SiO_2 — Al_2O_3 — B_2O_3$
8. $SiO_2 — Al_2O_3 — MgO — B_2O_3$
9. $CaO — SiO2 — FeO — B_2O_3$
10. $Na_2O — MgO — SiO_2$
11. $CaO — SiO_2 — Na_2O$
12. $CaO — SiO_2 — Na_2O — MgO$

Лаборатория БОР ХМИ им. Ж. Абишева располагает также расширенной базой данных для полного термодинамического анализа и компьютерного моделирования технологических процессов выплавки, легирования, внепечной обработки бор- и барийсодержащих металлов.

ВЫВОДЫ

1. Создан способ математического описания диаграмм фазового состава многокомпонентных систем, основанный на балансе распределения исходных компонентов по образующимся фазам.
2. Разработана математическая модель и компьютерная программа для численного расчета фазового состава в шестикомпонентной системе $CaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO–FeO–Fe_2O_3$.
3. Приведены примеры использования программы в различных отраслях промышленности.
4. Программа рекомендуется для использования в учебной, научной и производственной деятельности.

Список использованных источников

1. Куликов И. С. Десульфурация чугуна. М.: Металлургиздат, 1962, — 308 с.
2. Акбердин А. А. Разработка теории и технологии подготовки и металлургической переработки железорудного и ферросплавного сырья с использованием химически активных компонентов: дисс….. докт. техн. наук. — Алматы: 1994, — 300 с.
3. Heaht D.L. Mathematical treatment of multicomponent system // J. Amer. Ceram. Soc. — 1957. — 40. — 2. P. 50.
4. Палатник Л.С. Обобщенное правило «центра тяжести» для многокомпонентных систем // Доклады АН СССР. — 1954. — XCV. — 6.
5. Акбердин А.А. Балансовый метод расчета равновесного фазового состава многокомпонентных систем // КИМС. — 1995. — № 3. — С. 92–93.
6. Процюк А. Д, Карапетьянц М. Х. О термодинамическом исследовании процессов в многокомпонентных системах // Журнал прикладной химии. — 1977. — Т. 50, вып. 1. — 169 с.
7. Бережной А. С. Многокомпонентные системы окислов. — Киев: Изд-во «Наук. Думка», 1970. — 544 с.
8 Назаров Б.К., Акбердин А.А. Термодинамический анализ системы B2O3-CaO-SiO2-Al2O3 // Известия АН СССР. Металлы. — 1986. — № 6. — С. 61–63.
9. Журавлев Ф. М., Малышева Т. Я. Окатыши из концентратов железистых кварцитов. — М.: Металлургия, 1991. — 77 с.
10. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.Ш. Теория и технология производства ферросплавов. — М.: Металлургия, 1988. — 784 с.

11. Кадарметов Х.Н. Выбор шлаков пи выплавке углеродистого феррохрома и ферросиликохрома // Производство ферросплавов: сб. науч. тр. — М.: Металлургия, 1973. — С. 66–75.
12. Платонов В.Ю., Акбердин А.А. Использование боратовых руд в производстве хромистых сплавов на Аксусском заводе ферросплавов // сб. науч. тр. КГТУ. Вып. 5, Караганда, 1999. — С. 63–65.
13. Акбердин А.А., Гриненко В.И., Ким А.С., Есенжулов А.Б., Конуров У.К., Сарекенов К.З. Производство средне- и низкоуглеродистого феррохрома с использованием боратовых руд // Физико-химические и технологические вопросы металлургического производства Казахстана: сб. науч. тр. ХМИ. кн. 2. — Алматы: Искандер, 2002. — Т. 30. — С. 62–73.
14. Бутт Ю.М., Окороков С.Д. и др. Технология вяжущих веществ. — М.: «Высшая школа», 1965. — 550 с.
15. Акбердин А.А., Байсанов С.О. Аналитическое описание фазового равновесия в сталеплавильных шлаках // Изв. АН СССР. Металлы. — 1989. — № 3. — С. 21–23.
16. Акбердин А.А., Новиков В.С.,. Марсуверский Б.А. Фазовая диаграмма системы $CaO–MgO–SiO_2–Al_2O_3–TiO_2$ в аналитических выражениях // Известия ВУЗов. Черная металлургия. — 1989, № 12. — С. 23–30.
17. Платонов В.Ю., Акбердин А.А. Фазовый состав и физические свойства борсодержащих шлаков производства углеродистого феррохрома // сб. науч. тр. КарГТУ. Вып. 5. — Караганда, 1999. — С. 71–73.
18. Байгуатов Д.И., Акбердин А.А., Медиханов Д.Г. Фазовая диаграмма системы $CaO–SiO_2–FeO–MnO$ в аналитических выражениях // сб. науч. тр. по проблемам БГМК, посвящ. 10-летию независимости РК. — Балхаш, 2001. — С. 220–225.
19. Акбердин А.А., Конуров У., Ким А.С., Сарекенов К.З. Диаграмма системы $CaO–SiO_2–Al_2O_3–MgO–Cr_2O_3–FeO$ и её математическая модель для расчета фазового состава шлаков производства хромистых сплавов // Физико-химические и технологические вопросы металлургического производства Казахстана: сб. науч. тр. ХМИ. — Алматы, Искандер, 2002. — Т. 30, кн. 2. — С. 122–131.
20. Есенжулов А.Б., Акбердин А.А., Петлюх П.С. Фазовый состав шлаков производства среднеуглеродистого феррохрома // Физико-химические и технологические вопросы металлургического производства Казахстана: сб. науч.тр. ХМИ. — Алматы, Искандер, 2002. — Т. 30, кн. 2. — С. 255–259.

С.С. Квон, А.З. Исагулов, В.Ю. Куликов, КарГТУ

ОПЫТ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ «МЕТАЛЛУРГИЯ» В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ ИНДУСТРИАЛИЗАЦИИ

Одной из составляющих Государственной программы индустриально-инновационного развития (ГППИР) Республики Казахстан является подготовка специалистов по приоритетным специальностям, в число которых входит и специальность «Металлургия». Задачами программы ГППИР в черной металлургии являются:

1) повышение конкурентоспособности через диверсификацию и модернизацию;

2) создание условий по стимулированию внедрения инноваций, направленных на повышение качества продукции, увеличение производительности труда и снижение энергоемкости продукции;

3) увеличение производственных мощностей действующих предприятий и создание новых конкурентоспособных производств с высокой добавленной стоимостью;

4) сокращение объемов импорта металлопродукции за счет развития отечественного конкурентоспособного производства;

5) обеспечение действующих производств и инвестиционных проектов необходимой инфраструктурой;

6) обеспечение отрасли квалифицированными трудовыми ресурсами среднетехнического звена;

7) модернизация материально-технической и опытно-промышленной базы отраслевых институтов.

Подготовка кадров для проектов ГППИР ведется по 24 новым образовательным программам в 10 колледжах и 11 ВУЗах страны.

Черная и цветная металлургия являются региональной специализацией Карагандинской области. Черная металлургия исторически является крупным сектором, ее доля в обрабатывающей промышленности составляет 13 %.

Применение нанотехнологий в металлургической отрасли является одним из эффективных решений задач ГПИИР.

Металлургическая отрасль производит в основном конструкционные материалы, поэтому от использования нанотехнологий в этом сегменте, по крайней мере, в ближайшее время, не стоит ожидать таких невероятных чудес, как появление способных к самопроизводству наносистем-репликаторов, нанопреобразователей энергии или наномедицинских роботов-манипуляторов. Тем не менее, отраслевые компании продолжают активно инвестировать средства в наноматериаловедение, которое позволит в перспективе значительно улучшить потребительские свойства металлургической продукции.

Дальнейшее развитие машиностроения и металлургии без разработки новых конструкционных и теплоизоляционных материалов и совершенствования механических конструкций просто невозможно. Резервы повышения механических характеристик сталей различных структурных классов при помощи использования дорогостоящих легирующих элементов практически исчерпаны. Поэтому нанотехнологии считаются наиболее перспективным направлением для создания новых видов продукции с уникальными потребительскими свойствами. При разработке новых конструкционных материалов, которые должны нести механическую нагрузку, повышение предела прочности часто приводит к охрупчиванию. В то же время наноструктурированные материалы могут обеспечить оптимальное сочетание требуемых свойств, причем положительный эффект достигается благодаря особенностям структуры в нанометровом масштабе, а не в результате использования дорогих легирующих компонентов. Уменьшение размера частиц металлической заготовки от нескольких мкм до десятков нанометров теоретически должно привести к росту прочности на порядок.

Лидерами в области использования нанотехнологий в металлургии являются страны Евросоюза, США, Япония, Китай. В качестве примеров можно привести шведскую компанию Sandvik, которая разрабатывает наноструктурированную сталь Nanoflex для производства пуленепробиваемых жилетов и Bioline для производства медицинских инструментов. Компания (США) Exxon Mobil использует наноструктурированную сталь в производстве трубопроводов. General Electric занимается созданием наноструктурированных металлических сплавов для авиадвигателей. Компании Vallourec, AuberDuval (Франция) получают антикоррозионные трубы путем нанесения нанопокрытий. Такие металлургические компании как HebeiIron&Steel (Китай), NipponSteel (Япония), Sollac, Unimetal, Ascometal, Lofronte (Франция), SalzgitterAG, ThyssenKrupp AG (Германия), Posco (Южная Корея) используют методы обработки давлением для получения наноструктурной составляющей.

Основными направлениями развития нанотехнологий в металлургии являются:

- компактирование и спекание нанопорошков в порошковой металлургии,
- интенсивная пластическая деформация металла,
- обработка заготовок потоком высокоэнергетических частиц,
- нанесение упрочняющих металлических покрытий,
- кристаллизация наночастиц из аморфного состояния,
- внесение наночастиц модификатора в исходный расплав.

Развитие нанотехнологий в Казахстане, и, в частности, в металлургической отрасли ограничено рядом объективных причин:

- отсутствуют традиции по созданию и развитию нанотехнологий;
- недостаточное финансирование научно-исследовательских и опытно-
- конструкторских разработок в области нанотехнологий;
- отсутствие долгосрочных научно-технических программ;
- лаборатории практически не обеспечены современным технологическим оборудованием для получения наноматериалов;
- дефицит квалифицированных кадров для обеспечения отрасли;
- низкий уровень информационного обеспечения по вопросам нанотехнологий, отсутствие информаций на государственном языке; нет постоянно действующих масштабных нанотехнологических форумов и конференций мирового уровня;
- нет единой терминологии по нанотехнологиям и наноматериалам, регламентирующей нормативную и методическую базу для проведения измерений, испытаний и контроля, устанавливающей

критерии соответствия, качества и безопасности нанообъектов, наноматериалов и иной нанотехнологической продукции;
- низкая доля производства высокотехнологичных и наукоемких видов продукции.

Основные исследования в области нанотехнологий в стране проводятся в ННЛОТ при КазНУ им. аль-Фараби.

В Карагандинском государственном техническом университете проводится ряд исследований в области нанотехнологий. Кафедра «Нанотехнологии и металлургия» является специализированным подразделением, занимающимся решением вопросов, связанных с теоретическими исследованиями и практической реализацией нанотехнологий в металлургии.

С целью подготовки квалифицированных специалистов, способных в ближайшее время на практике реализовать использование нанотехнологий в металлургических производствах в Карагандинском государственном техническом университете была разработана образовательная программа «Нанотехнологии в металлургии». Программа разработана на основе аналогичных учебных программ университета Лотарингии (Франция) и Колорадской горно-металлургической школы (США). Программа рассчитана для подготовки специалистов второй ступени — магистров по специальности «Металлургия», срок обучения — 1,5 года. К обучению на конкурсной основе принимаются бакалавры, успешно сдавшие экзамены по английскому языку и по специальности и имеющие все необходимые пререквизиты.

Зарубежными вузами-партнерами для реализации новой образовательной программы являются:
- Лаборатория по исследованию механики и микроструктур материалов LEM3 (г. Мец, Франция);
- Ecole des Mines (г. Нанси, Франция);
- Луизианский технический университет (США);
- Колорадская горная школа (США);
- НИ Томский политехнический университет (РФ);
- НИТУ МИСИС (РФ);
- НИУ СПбПУ Петра Великого (РФ).

Целью образовательной программы «Нанотехнологии в металлургии» является подготовка специалистов по современным технологиям производства наноструктурных изделий из сплавов черных и цветных металлов с заданными свойствами для решения задач ГПИИР.

Выпускники должны быть компетентными: в области совершенствования методологических подходов к решению задач в области нанотехнологии; в области оценки научной значимости и перспективы прикладного использования результатов исследований в области нанотехнологий; применять методы и компьютерные системы моделирования и анализа материалов и компонентов нано- и микросистемной техники; анализировать свойства наночастиц и наноматериалов, возможные способы их получения; применять современные методы расчета и анализа нано- и микросистем; уметь прогнозировать изменение свойств и характеристик наноструктур при изменении внешних условий или воздействий.

В структуру подготовки образовательной программы входят:
- кафедра «Нанотехнологии и металлургия»;
- испытательная лаборатория инженерного профиля «Комплексное освоение ресурсов минерального сырья»;
- Международный центр материаловедения;

В работе над созданием и развитием Программы (разработка, экспертиза, чтение лекций) принимали участие ученые из вузов Франции, США, России, Литвы. С осеннего семестра 2016/17 учебного года более 50% занятий проводятся на английском языке.

В 2015 году состоялся первый набор магистрантов по образовательной программе «Нанотехнологии в металлургии». Был осуществлен набор 63 магистрантов. Магистранты выполняют магистерские работы для решения конкретных проблем предприятий, включенных в Карту индустриализации Карагандинской области. Для этого были заключены трехсторонние соглашения между магистрантов, вузом и предприятием, входящим в Карту индустриализации, такими как АО «АрселорМиттал Темиртау», ТОО «EuroPack», ТОО «Корпорация «Казахмыс», ТОО «Tau-ken Temir» и др.

Магистерские диссертации выполняются строго по тематике предприятий ГПИИР, с которыми подписаны 3-х сторонние договора на практику и трудоустройство магистрантов с учетом необходимости решения задач конкретных проектов, входящих в Карту индустриализации.

Для сочетания вузовской теории и практического опыта ведущих промышленных компаний, организации производственных практик, проведения научных исследований и выполнения диссертационных работ более 50% занятий проводится на филиалах кафедры при ХМИ им. Ж.Абишева и ТОО «КМЗ им. Пархоменко». Это позволяет легко адаптировать выпускников в производственные условия.

Для более эффективной реализации новой образовательной программы в рамках реализации ГПИИР разработаны профессиональные стандарты по всем восьми квалификационным уровням для доменного и сталеплавильного производства, заключены соглашения с предприятиями о потребностях в выпускниках, проводятся стажировки ППС на предприятиях ГПИИР.

Таким образом, интеграция образовательных, научных и инновационных процессов обеспечивает максимально мультипликативный эффект в области подготовки специалистов по специальности «Металлургия» по новой образовательной программе.

В.Ю. Куликов, С.С. Квон, КарГТУ

ПОДГОТОВКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ КАДРОВ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ — ФАКТОР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГПИИР-2

Черная и цветная металлургия являются региональной специализацией Карагандинской области. Черная металлургия исторически является крупным сектором, и ее доля в обрабатывающей промышленности составляет 13%.

Задачами программы Государственной программы индустриально-инновационного развития Республики Казахстан (ГПИИР-2) в черной металлургии являются:

1) повышение конкурентоспособности через диверсификацию и модернизацию;

2) создание условий по стимулированию внедрения инноваций, направленных на повышение качества продукции, увеличение производительности труда и снижение энергоемкости продукции;

3) увеличение производственных мощностей действующих предприятий и создание новых конкурентоспособных производств с высокой добавленной стоимостью;

4) сокращение объемов импорта металлопродукции за счет развития отечественного конкурентоспособного производства;

5) обеспечение действующих производств и инвестиционных проектов необходимой инфраструктурой;

6) обеспечение отрасли квалифицированными трудовыми ресурсами среднетехнического звена;

7) модернизация материально-технической и опытно-промышленной базы отраслевых институтов.

Применение нанотехнологий в металлургической отрасли является одним из эффективных решений задач ГПИИР-2.

Дальнейшее развитие машиностроения и металлургии без разработки новых конструкционных и теплоизоляционных материалов и со-

вершенствования механических конструкций просто невозможно. Резервы повышения механических характеристик сталей различных структурных классов при помощи использования дорогостоящих легирующих элементов практически исчерпаны. Поэтому нанотехнологии считаются наиболее перспективным направлением для создания новых видов продукции с уникальными потребительскими свойствами. При разработке новых конструкционных материалов, которые должны нести механическую нагрузку, повышение предела прочности часто приводит к охрупчиванию. А наноструктурированные материалы могут обеспечить оптимальное сочетание требуемых свойств, причем положительный эффект достигается благодаря особенностям структуры в нанометровом масштабе, а не в результате использования дорогих легирующих компонентов. Уменьшение размера частиц металлической заготовки от нескольких мкм до десятков нанометров теоретически должно привести к росту прочности на порядок.

Лидеры в области использования нанотехнологий в металлургии (страны Евросоюза, США, Япония, Китай), конкретные фирмы и их продукция в описываемой области (Например, шведская компания Sandvik разрабатывает наноструктурированную сталь Nanoflex для производства пуленепробиваемых жилетов и Bioline для медицинских инструментов. Американская компания ExxonMobil использует наноструктурированную сталь в производстве трубопроводов. GeneralElectric занимается созданием наноструктурированных металлических сплавов для авиадвигателей. Французские Vallourec, AuberDuval получают антикоррозионные трубы путем нанесения нанопкрытий, используют методы обработки давлением для получения наноструктурной составляющей такие металлургические компании как HebeiIron&Steel (Китай); NipponSteel (Япония); Sollac, Unimetal, Ascometal, Lofronte (Франция); SalzgitterAG, ThyssenKrupp AG (Германия), Posco (Южная Корея).

Основные направления развития нанотехнологий в металлургии:

- компактирование и спекание нанопорошков в порошковой металлургии,
- интенсивная пластическая деформация металла,
- обработка заготовок потоком высокоэнергетических частиц,
- нанесение упрочняющих металлических покрытий,
- кристаллизация наночастиц из аморфного состояния,
- внесение наночастиц модификатора в исходный расплав.

Вместе с тем в развитии нанотехнологий в Казахстане, и, в частности, в металлургической отрасли:

- отсутствует традиция по созданию и развитию нанотехнологий;
- недостаточное финансирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок в области нанотехнологий;
- отсутствие долгосрочных научно-технических программ; лаборатории практически не обеспечены современным технологическим оборудованием для получения наноматериалов;
- дефицит квалифицированных кадров для обеспечения отрасли;
- низкий уровень информационного обеспечения по вопросам нанотехнологий, отсутствие информаций на государственном языке; нет постоянно действующих масштабных нанотехнологических форумов и конференций мирового уровня;
- нет единой терминологии по нанотехнологиям и наноматериалам, регламентирующей нормативную и методическую базу для проведения измерений, испытаний и контроля, устанавливающей критерии соответствия, качества и безопасности нанообъектов, наноматериалов и иной нанотехнологической продукции;
- низкая доля производства высокотехнологичных и наукоемких видов продукции.

Основные исследования в области нанотехнологий в стране проводятся в Национальной лаборатории открытого типа при КазНУ им. аль-Фараби.

В Карагандинском государственном техническом университете проводится ряд исследований в области нанотехнологий. Кафедра «Нанотехнологии и металлургия» является специализированным подразделением, занимающимся решением вопросов, связанных с теоретическими исследованиями и практической реализацией нанотехнологий. По своему интеллектуальному и материально-техническому потенциалу кафедра соответствует мировым трендам в науке и технике.

С целью подготовки квалифицированных специалистов, способных в ближайшее время на практике реализовать использование нанотехнологий в металлургических производствах в Карагандинском го-

сударственном техническом университете была разработана образовательная программа «Нанотехнологии в металлургии» на основе аналогичных учебных программ университета Лотарингии (Франция) и НИУ СПбПУ Петра Великого (Россия).

Зарубежными вузами-партнерами являются:

- Лаборатория по исследованию механики и микроструктур материалов LEM3 (Франция),
- Университет Лотарингии (Нанси, Франция, QS551),
- Университет Луизианы (Растон, США, QS650),
- НИ Томский политехнический университет (Томск, РФ, QS491),
- НИТУ МИСИС (Москва, РФ, QS701),
- НИУ СПбПУ Петра Великого (Санкт-Петербург, РФ, QS481).

Целью образовательной программы «Нанотехнологии в металлургии» является подготовка специалистов по современным технологиям производства наноструктурных изделий из сплавов черных и цветных металлов с заданными свойствами для решения задач ГПИИР-2.

В структуру подготовки образовательной программы входят:

- кафедра «Нанотехнологии и металлургия»;
- испытательная лаборатория инженерного профиля «Комплексное освоение ресурсов минерального сырья»;
- международный центр материаловедения.

Для подготовки высококвалифицированных кадров на кафедре «Нанотехнологии и металлургия» имеется 7 учебных лабораторий, оснащенных различным учебным оборудованием для исследования и оценки характеристик материалов, таким как индукционная печь УИП, фотоседиментометр, разрывная машина КСИМ-40, твердомеры, металлографические микроскопы и др. таких ведущих мировых производителей как Instron (Англия), Jeol (Япония), PanAnalitical (Голландия), Struers (Дания), ЛОМО (Россия) на общую сумму 572 млн. тенге.

Создана принципиально новая лаборатория нанометаллургических процессов, оснащенная уникальным оборудованием в области получения и исследования наноматериалов.

В работе над созданием и развитием Программы (разработка, экспертиза, чтение лекций) принимали участие ученые из вузов Франции, США, России, Литвы.

В 2015 году состоялся первый набор магистрантов по образовательной программе «Нанотехнологии в металлургии». Был осуществлен набор 63 магистрантов. Магистранты выполняют магистерские работы для решения конкретных проблем предприятий, включенных в Карту индустриализации Карагандинской области. Для этого были заключены трехсторонние соглашения между магистрантов, вузом и предприятием, входящим в Карту индустриализации, такими как АО «АрселорМиттал Темиртау», ТОО «EuroPack», ТОО «Корпорация «Казахмыс» и др. С осеннего семестра 2016/17 учебного года 50% занятий будут проводиться на английском языке. Магистерские диссертации выполняются строго по тематике предприятий ГПИИР-2, с которыми подписаны 3-х сторонние договора на практику и трудоустройство магистрантов с учетом необходимости решения задач конкретных проектов, входящих в Карту индустриализации Карагандинской области. Для сочетания вузовской теории и практического опыта ведущих промышленных компаний, организации производственных практик, проведения научных исследований и выполнения диссертационных работ 60% занятий проводится на филиалах кафедры при ХМИ им. Ж.Абишева и ТОО «КМЗ им. Пархоменко». Это позволяет легко адаптировать выпускников в производственные условия.

Таким образом, современное развитие научно-технического прогресса, промышленности, сферы бизнеса и общества в целом выдвигает требования по подготовке в Казахстане качественно новых кадров с высоким уровнем знаний в предметной области, в полной мере владеющих новейшими достижениями передовых технологий. Имея значительный экономический и человеческий капитал, богатые природные ресурсы, основную производственную инфраструктуру, устойчивую финансовую систему, Казахстан способен трансформировать вызовы, созданные текущим мировым экономическим кризисом, в новые возможности для достижения сбалансированного и устойчивого развития.

ЗАСЛУЖЕННЫЕ ДОМЕНЩИКИ

Ашпин Борис Иннокентьевич (12.12.1928)

Борис Иннокентьевич Ашпин родился 12 декабря 1928 года в городе Бийске в семье крестьянина. Детские и школьные годы прошли в с. Тогул, Алтайского Края. Он рано остался без отца — воспитывали мама, работавшая бухгалтером, и дедушка. В 1947 году с котомкой в руках и сапогами через плечо пришел в Новокузнецк и поступил в Сибирский металлургический институт, на кафедру металлургии чугуна. Профессии металлурга-доменщика он посвятил всю свою жизнь, стал впоследствии крупным организатором металлургического производства и одним из ведущих в стране специалистов-доменщиков. В 1951–1952 играл в футбол за команду Металлург.

После окончания института в 1952 году Борис Иннокентьевич поступил на работу в доменный цех Кузнецкого металлургического комбината. С упорством и настойчивостью в течение 14 лет изучал тонкости доменного производства под руководством создателей одной из лучших в стране школ доменщиков — А. Ф. Борисова, Б. Н. Жеребина и др. На Кузнецком меткомбинате Борис Ашпин прошел путь от горнового до обер-мастера.

В 1964 году за 2 месяца до пуска первой доменной печи — «Запсибовны», как ласково её называли доменщики, Б.И. Ашпин был назначен на работу начальником доменного цеха на новый, строящийся Западно-металлургический завод, впоследствии ставший комбинатом. Сразу же пришлось столкнуться с серьезными трудностями по освоению новых узлов оборудования, впервые применяемых на комбинате. С этого времени вся десятилетняя производственная деятельность Борис Иннокентьевича в качестве начальника цеха была связана с творческим поиском и внедрением новых технических и организаторских решений, направленных на повышение производительности доменных печей, совершенствование технологии, механизации и автоматизации процессов плавки. Под его руководством внедрены такие крупные технические мероприятия, как технология плавки на высокоглиноземистых и высокомагнезиальных шлаках, обогащение дутья угольной пылью, мазутом, кислородом и природным газом, сортировка кокса и агломерата и раздельная подача их в доменную печь.

Борис Иннокентьевич Ашпин автор более 25 изобретений, более 75 рационализаторских предложений, ему присвоены звания «Изобретатель Минчермета», «Заслуженный металлург РФ». Большая часть его изобретений внедрена в производство, в те годы экономический эффект от их внедрения составил свыше 7 млн рублей.

В 1974 году Ашпин Б.И. становится главным инженером завода, а через 6 лет — Генеральным директором. Досталось ему расстроенное хозяйство. План по всем переделам в 1980 году не был выполнен, аварийность захлестнула все цехи, подорвала работу агрегатов и нехватка сырья. На заводе была разработана комплексная программа перевооружения, направленная на ускорение технического прогресса, повышение качества продукции и выполнение заказов народного хозяйства. Три года подряд комбинат становился победителем социалистического соревнования. В павильоне «Металлургия» на ВДНХ СССР открылась экспозиция «Западно-Сибирский металлургический комбинат» — победитель соревнования 1983 года».

В 1984 году на комбинате развернулось движение за стопроцентное выполнение заказов, которое в следующем году привело к победе — комбинат стал полностью выполнять заказы. В последнем году XI пятилетки коллектив комбината работал так, как никогда за всю историю существования предпри-

ятия. Достигнуто максимальное за время работы комбината производство чугуна, стали, проката. Дополнительно к плану реализовано продукции на 34 млн рублей. Треть её отгружена со знаком качества, получена экономия от снижения себестоимости 36 млн рублей. По результатам пятилетки комбинат наградили переходящим красным знаменем ЦК КПСС, Совета министров СССР, ВЦСПС и ЦК ВЛКСМ, около 300 человек были награждены орденами и медалями, а Борису Иннокентьевичу присвоено звание Героя Социалистического Труда.

С 1986 по 1990 гг. Б. И. Ашпин работал заместителем министра черной металлургии СССР — начальником ВПО «Союзметаллургпром». Он возглавлял государственную комиссию по приему в эксплуатацию пятой доменной печи на Череповецком металлургическом комбинате — знаменитой «Северянки», самой крупной домны в бывшем СССР и в мире. За время его работы Минчерметом СССР были введены в эксплуатацию цех белой жести на Карагандинском металлургическом комбинате и конверторный цех на Магнитогорском металлургическом комбинате.

В 1990–1993 годах Б. Ашпин руководил группой российских специалистов на Бхилайском металлургическом заводе в Индии, за годы его руководства всеми цехами предприятия были освоены проектные мощности. С 1993 по 1997 годы исполнял обязанности советника председателя комитета РФ по металлургии, одновременно широко участвовал в проведении технических консультаций на многих предприятиях в России и за рубежом.

В период с 1998 по 2003 год — председатель Совета ветеранов черной и цветной металлургии.

Государственные награды: золотая медаль Героя Социалистического Труда «Серп и молот», 3 ордена Ленина, орден Трудового Красного Знамени, орден «Знак Почёта», многие медали. Имеет почетные звания «Заслуженный металлург РФ», лауреат Государственной премии Совета Министров РФ. Почётный гражданин Кемеровской области (с 30 мая 2007 года).

Большаков Вадим Иванович (03.09.1938 — 28.06.2015)

Вадим Иванович Большаков (03.09.1938) — известный украинский ученый в области механики машин и черной металлургии, Заслуженный деятель науки и техники Украины, член-корреспондент Национальной академии наук Украины, академик Инженерной академии Украины, академик Международной инженерной академии, Заслуженный инженер России, директор Института черной металлургии (ИЧМ) им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Большаков Вадим Иванович закончил Днепропетровский металлургический институт в I960 году. Всю свою трудовую деятельность В.И. Большаков посвятил работе в Институте черной металлургии им. З.И. Некрасова: кандидат технических наук (1966), старший научный сотрудник (1969), доктор технических наук (1988), профессор (1991). С 1993 г. заведующий «Отделом технологического оборудовании и систем управления». Основу научной деятельности В.И.Большакова составляют исследования к области динамики металлургических машин, технологии доменной плавки, оборудования и автоматизации загрузки доменных печей. Определил и установил причины увеличения момента технологического сопротивления при захвате листа валками. Усовершенствовал математическое описание нелинейных замкнутых систем с упругими связями. Исследовал динамику прокатных станов. Разработал основы управления нагрузкой и распределением шихты в доменных печах. Руководил пусковыми исследованиями, освоением и научно-техническим сопровождением наибольших в мире доменных печей, оборудованных бесконусными загрузочными устройствами. С 2000 г. член-корреспондент НАН Украины. С 1996 г. — директор ИЧМ. В этот период деятельность дирекции была сосредоточена на поиске новых форм организации и проведения научных исследований, обеспечении стабильности финансовой деятельности Института, определении перспек-

тивных направлений научных исследований. Не все задачи решены в полном объеме, но удалось главное — Институт сохранил научный потенциал и способен выполнять комплексные научные исследования по основным направлениям деятельности и по всем переделам черной металлургии.

В настоящее время в составе Института 12 научных отделов и ряд функциональных подразделений, обеспечивающих научную и хозяйственную деятельность, в том числе экспериментально-производственное предприятие. Институт, являясь головной организацией в отрасли по основным переделам металлургического производства, выполняет работы в таких приоритетных научно-технических направлениях: определение тенденций развития металлургии и совершенствование технологических процессов; энерго- и ресурсосбережение на всех стадиях металлургических переделов; кардинальное улучшение качества металлопродукции и доведение его до уровня требований международных стандартов; создание высокоэффективного надежного оборудования систем автоматического управления его работой; расширение сырьевой базы предприятий горно-металлургического комплекса с ориентацией на собственные природные ресурсы; разработка новых теоретических концепций, оригинальных технических решений и компьютерных программ для решения первоочередных задач черной металлургии. Значительный вклад внесен учеными Института в разработку и научно-техническое сопровождение.

В.И. Большаков был руководителем и одним из наиболее плодотворно работающих представителей всемирно известной научной школы С.Н. Кожевникова, создавшей основы динамики металлургических машин и агрегатов. С именем В.И. Большакова связаны разработка моделей нелинейных электромеханических систем с упругими связями, математический анализ разветвленных и замкнутых систем, создание метода систематизации нагрузок приводов прокатных станов, разработка теории захвата металла на листопрокатных станах. Обобщение этих разработок позволило сформулировать и описать методику исследования динамики нелинейных электромеханических систем приводов с упругими связями. Значительный вклад он внес в разработку и исследования резинометаллических узлов металлургических машин.

Фундаментальный вклад в развитие металлургической науки внесли работы В.И. Большакова по созданию научных основ управления распределением шихты и газов в доменных печах. Результаты этих работ составили базу конструирования нового оборудования для доменных печей большого объема, в том числе конвейерных шихтоподач и бесконусных загрузочных устройств. В.И. Большаков был несомненным лидером в европейском научно-инженерном сообществе, работающем в области конструирования систем загрузки и программ управления распределения шихты и газов в доменных печах, диагностики и автоматизации управления металлургическими процессами и оборудованием. Успехи его деятельности определяются широтой кругозора, творческим подходом, большим объемом профессиональных знаний.

Профессор В.И. Большаков руководил научной школой по механике металлургических машин, он возглавлял отдел технологического оборудования и систем управления ИЧМ, разработал методические основы расчета технологических линий. Под его руководством на базе исследований металлургических агрегатов разработаны и внедрены новые режимы управления технологическими процессами; на всех этапах проектирования и эксплуатации доменных печей, в том числе и крупнейших в мире — ДП-9 «Криворожстали» и ДП-5 АО «Северсталь», разработаны рекомендации по совершенствованию этих агрегатов и режимов их работы.

Вадима Ивановича Большакова — крупного ученого, педагога, видного общественного деятеля, организатора научных исследований — отличала большая работоспособность, увлеченность и преданность делу, принципиальность, порядочность, скромность и чуткость. Эти качества снискали ему авторитет и уважение коллег и инженерно-технических работников металлургической промышленности Украины и стран СНГ. По результатам исследований и разработок В. И. Большаков опубликовал 18 монографий, более 900 научных статей, получено 107 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Под его научным руководством подготовлено и защищено 6 докторских и 6 кандидатских диссертаций.

Борисов Александр Филиппович (04.11.1908 — 22.08.2001)

Борисов А.Ф. родился 4 ноября 1908 года в деревне Староселье (ныне — Горецкий район, Могилёвская область, Белоруссия).

Окончил Ленинградский горный институт, инженер-металлург. Лауреат Государственной премии СССР (1951). Награжден орденами Ленина (четырежды), Трудового Красного Знамени (дважды), медалями. Принимал участие в строительстве Кузнецкого металлургического комбината: горновой, начальник доменного цеха; в 1945–1954 гг. — на Магнитогорском металлургическом комбинате: в 1945 году Борисов А.Ф. был назначен начальником крупнейшего в стране доменного цеха ММК. Десять человек сменились за полтора десятка лет на этой хлопотливой должности, Александр Филиппович был одиннадцатым. Он приехал в Магнитку не с Кузнецкого комбината, как значилось в официальной версии, а через Москву с американского континента, где выполнял спецзадание правительства по ленд-лизу — поставкам в СССР вооружения, боеприпасов, стратегического сырья, продовольствия. С подачи знаменитейшего в стране академика И.П. Бардина Борисов А.Ф. получил сложнейшее задание от правительства СССР, во время выполнения которого у него появилась возможность детально ознакомиться с состоянием заокеанской металлургии, что впоследствии помогло ему при работе в доменном цехе Магнитки. — Очень долго пришлось отлаживать деятельность цеха, — вспоминал Борисов впоследствии. — Два года доменщики не выполняли производственных заданий. С повестки дня на всех уровнях не снимался вопрос о возможности выполнения плана производства и способности руководства наладить работу. Было все — и горечь поражения, и обиды, и бессонные ночи. Я находился в цехе безотлучно неделями, были и ругань, и потеря друзей, но никого из нас, моих единомышленников, не покидала вера в успех. Всем было ясно, что Борисов А.Ф. — руководитель более высокого ранга, чем начальник цеха, хотя и в этой должности он чувствовал себя, как говорится, на своем месте. Стиль его работы — умение побуждать в людях активность, стремление думать, творить. Борисов говорил: «Мастер, инженер, действующие по трафарету, быстро теряют квалификацию». Борисов А.Ф. назначен главным инженером ММК, в 1951–1954 гг. — директором. Участвовал в работах по переводу доменных печей на работу с повышенным давлением газа под колошником, использованию в шихте офлюсованного агломерата, освоению выплавки маломарганцовистого чугуна, увеличению мощности мартеновских печей, вводу в строй листопрокатного цеха № 2, сдаче в эксплуатацию доменных печей № 7 и 8, мартеновских печей № 26 и 27. Под его руководством впервые в стране был освоен метод крупнопанельного домостроения и построено большое количество жилья для металлургов, несколько школ, детских садов, новые корпуса городской больницы, поликлиника и др. объекты соцкультбыта. За коренное усовершенствование методов труда и внедрение новой техники удостоен Государственной премии СССР.

В 1957–60 г.г. Борисов А.Ф. — заместитель председателя Госплана РСФСР, заместитель председателя ВСНХ (1960–61), председатель Челябинского (Южно-Уральского) совнархоза (1961–64). В 1954–57 и в 1965–84 1-й заместитель министра черной металлургии СССР. Под его руководством проектировались и строились в СССР мощные доменные печи объемом от 1700 до 5580 м^3. Борисов А.Ф. автор книги «Советы начальнику доменного цеха». Инженер-доменщик, организатор производства, Герой Социалистического Труда (1958), лауреат Сталинской премии (1951) за коренное усовершенствование условий труда и внедрение новой техники, заслуженный металлург РСФСР (1984). Депутат Верховного Совета СССР. Делегат 22-го, 23-го съездов партии. Кандидат в члены ЦК КПСС (1961–66), член бюро Челябинского обкома КПСС. Награжден 4 орденами Ленина (1943, 1952, 1958, 1966), орденом Октябрьской Революции (1971), 3 орденами Трудового Красного Знамени (1951, 1968, 1978), медалями.

Вегман Евгений Феликсович

Родился 1928 годы в Кашире в семье инженера. В молодости серьезно рассматривал музыкальное образование и карьеру военного моряка, однако в 1944 году поступил в Московский институт Стали и Сплавов (МИСиС). В 1950 году уезжает в Челябинск, где в течении 5 лет работает в доменном цехе на сменных должностях. В середине пятидесятых успешно поступает в аспирантуру и с этого момента вся его жизнь связана с научной и преподавательской деятельностью в МИСиС. Как ученый Е.Ф. Вегман формируется под влиянием профессоров А.Н. Похвиснева и С.И. Шарова, а также члена коррспондента АН СССР В.В. Лапина. В 1955 году защищает кандидатскую диссертацию.

К концу пятидесятых годов Е.Ф. Вегман полностью опровергает наиболее популярную в то время ферритокальциевую теорию и формулирует принципиально новую «блочную» теорию строения агломерата, в которой был определен порядок взаимодействий компонентов аглошихты в твердой и жидкой фазах и последующее формирование концентрически-зональной, блочной структуры в процессе охлаждения агломерата. В 1963 году выходит, ставшая теперь уже классическим трудом, книга «Процесс агломерации», положившая начало подлинно научного описания и исследования этого процесса.

К 1967 году в возрасте 39 лет Евгению Феликсовичу удалось подготовить докторскую диссертацию. Несмотря на положительный результат, реформаторский характер идей и слишком «молодой», по мнению «генералов науки», возраст соискателя привели к тому, что защита далась очень нелегко. Обсуждение продолжалось 5 часов, причем были высказаны как положительные, так и отрицательные мнения. Только твердая позиция кафедры и официальных оппонентов, которым пришлось выступать дважды, склонили мнение членов ученого совета в пользу диссертанта.

Е.Ф. Вегман был прекрасным преподавателем и педагогом «от бога» и с большим удовольствием занимался со своими учениками. Поэтому итогом его пятидесятилетней работы стали не только две сотни статей, полтора десятка монографий и более ста патентов, но и около 70 диссертаций выпущенных под его руководством и более 300 инженеров металлургов, подготовленных им для отрасли. Он придерживался изобретенной лично им двухбалльной системы оценки знаний, считая что только жизнь является настоящим экзаменатором ставил отлично только тем, кто в совершенстве изучил предмет, а хорошо все остальным.

В последние годы жизни, будучи уже маститым ученым Е.Ф. Вегман не потерял вкус к новым идеям и по выражению сослуживцев «сжигает то, чему поклонялся». Он, вместе с профессорами В.А. Роменцом и А.В. Ванюковым, увлеченно разрабатывает процесс жидкофазного получения чугуна без агломерационного передела — «Ромелт». В этот период Евгений Феликсович получает новый творческий импульс. Он снова выпускает аспирантов, пишет статьи, получает патенты и выступает с популярными лекциями. Судьба процесса «Ромелт» до сих пор не решена и оказалась непростой поскольку в период распада СССР была надолго разрушена существовавшая система внедрения новой техники в металлургии.

С 1977 года Е.Ф. Вегман становится профессором МИСиС, а затем и заведующим кафедрой «руднотермических процессов». Последующие десять лет стали нелегким испытанием для руководителя научного коллектива так как совпали с началом перестройки и вместе судьбой ученого-реформатора сказались на его раннем уходе из жизни. Евгения Феликсовича не стало в 1987 году в возрасте 72 лет.

Жеребин Борис Николаевич (1908–07.05.2005)

Борис Николаевич Жеребин родился в с. Узян, ныне Белорецкого района Башкортостана в семье горнозаводского техника. В 1930 окончил Сибирский технологический институт (Томск). 1925–1926 — исполнитель по технической отчетности Бисертского металлургического завода (Уральская область); 1926 — хронометражист технико-экономического бюро Нижне-Уфалейского металлургического завода (Уральская область); 1926–1930 — студент Сибирского металлургического института (г. Томск). 1930–1931 — сменный инженер доменного цеха Нижне-Тагильского металлургического завода (Свердловская область). (1908 – 7 мая 2005) — российский промышленный деятель, металлург, Герой Социалистического Труда, доктор технических наук.

С 8 апреля 1931 по 1957 работал на Кузнецком металлургическом комбинате в должностях — инженер по монтажу оборудования строительства доменного цеха, сменный инженер, начальник смены доменного цеха, начальник блока печей, помощник начальника доменного цеха, начальник доменной печи № 4, главный инженер. Борис Николаевич активно участвует в строительстве первой доменной печи КМК, которая 3 апреля 1932 года дала первый чугун. Первая плавка чугуна под его, молодого инженера руководством, была выдана 3 апреля 1932 года. Этот день считается рождением Кузметкомбината. Через месяц была запущена вторая доменная печь. Завод начал набирать темпы, давать стране все больше и больше металла. В 1933–1935 годах доменный цех, в котором работал Б.Н. Жеребин, ввёл в строй вторую очередь — ещё две домны. К 1936 году доменный цех, как и весь Кузнецкий металлургический комбинат, заработал в полную силу. К этому времени были освоены местные угольные и рудные месторождения. Бориса Николаевича Жеребина назначают начальником блока печей. Во время Великой Отечественной войны металлурги Кузнецкого комбината, выполняя срочное правительственное задание, быстро перешли на производство броневого проката. Советские танки Т-34 «оделись» в кузнецкую броню. Также стал выпускаться снарядный легированный прокат. В начале 1942 года заместитель начальника доменного цеха Б.Н. Жеребин в числе пяти инженеров завода приступил к выполнению исследования, направленного на повышение качества стали и снижение себестоимости металла. А уже 3 мая 1942 года одна из доменных печей КМК была переведена на выплавку маломарганцевистого чугуна. Первые же результаты показали, что снижение марганца в чугуне позволяет значительно увеличить производительность доменных печей, уменьшить себестоимость чугуна и при мартеновском переделе последнего получить сталь требуемого качества. В марте 1943 года доменный цех КМК перешел на выплавку, а мартеновские цеха — на передел низкомарганцевистого чугуна. В итоге только за март 1943 года доменным цехом КМК было получено 6800 тонн добавочного чугуна и сэкономлено 3800 тонн кокса, 4400 тонн известняка и 11000 тонн марганцевистой руды. К 1944 году производство выросло до 7000 тонн проката в месяц, а в 1945 году производительность была увеличена дополнительно. В июне 1943 года Б.Н. Жеребин был назначен начальником доменного цеха. За самоотверженный труд во имя Победы он был награждён орденом Трудового Красного Знамени, орденом Красной Звезды и медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.». После войны Борис Николаевич Жеребин являлся одним из известных рационализаторов и изобретателей в Минчермете. Он был автором скоростного метода реконструкции доменных печей, за что в 1949 году Борису Николаевичу присудили Государственную премию. Он предложил более современную футеровку доменных печей, систему автоматической подачи дутья по фурмам, за это был отмечен Дипломом первой степени Президиума центрального правления Научно-технического отдела чёрной металлургии. Его изобретения и рационализаторские предложения значительно улучшали качество выплавляемого металла, увеличивали производи- тельность печей. В 1953–1957 годах он трудился на посту главного инженера КМК. В 1957 году Борис Николаевич Жеребин назначается директором КМК и в течение восьми лет успешно руководит металлургическим гигантом. При нём на комбинате производилась каждая восьмая тонна металла в стране, производительность труда уве-

личилась на 63%. Он всегда умело сочетал производство с научно-исследовательской деятельностью. Направлял творческий коллектив своих учеников на решение вопросов автоматизации, механизации, улучшения экологии. Благодаря этому кузнецкие металлурги долгие годы были лидерами отрасли.

1965–1968 — главный консультант по эксплуатации и строительству 2-й очереди Бхилайского металлургического завода (Индия) и руководитель группы советских специалистов. Внес существенный вклад в развитии теории и практики доменного производства, в создание передовой школы доменщиков. Опубликовано более 40 работ. В 1968–1970 — зав. кафедрой металлургии чугуна Сибирского металлургического института; 1970–1990 — заведующий кафедрой, профессор кафедры рудно-термических процессов Института стали и сплавов.

С 1990 — пенсионер, г. Москва. В 1958 было присвоено звания Героя Социалистического Труда за выдающиеся успехи, достигнутые в деле развития черной металлургии. Награжден орденами: Ленина (1952, 1958), Трудового Красного Знамени (1945, 1951), Отечественной войны I степени (1945), Красной Звезды (1943); медалями: «За трудовую доблесть», «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.», «За особый вклад в развитие Кузбасса» I и II степеней. Лауреат Сталинской премии (1949). / Депутат Верховного Совета РСФСР V–VI созывов, депутат Кемеровского областного Совета депутатов трудящихся VI созыва. Состоял в рядах ВКП(б)-КПСС (1944–1991), был делегатом XXII съезда КПСС, член Кемеровского обкома КПСС (1957–63). Член КПРФ (1992–2000).

Калугин Яков Прокопьевич (10.07.1937 – 04.11.2012)

Советский, российский инженер-металлург, доктор технических наук, академик Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова.

Изобретатель доменного бесшахтного воздухонагревателя без камеры горения с горелкой на верху купола (ВНК, воздухонагреватель Калугина).

Родился в Казахстане, селе Киевка, в семье военного врача-хирурга. В связи с постоянными переездами своего отца на разные места службы семья часто меняла место жительство.

В 1961 году окончил с отличием Новокузнецкий металлургический институт и принят на должность инженера в Уральский научно-исследовательский трубный институт. В 1963 году поступил в ВНИИ металлургической теплотехники (ВНИИМТ), в котором затем работал в должностях от младшего научного сотрудника до заведующего лабораторией. В 1971 году защитил кандидатскую диссертацию, а в 2009 году докторскую диссертацию и был избран действительным членом АИН им. А. М. Прохорова.

Задача разработки аппарата для нагрева дутья с температурой 1700°С и давлением 10 атм перед лабораторией Я.П. Калугина была поставлена Министерством черной металлургии СССР для МГД-электростанции в Рязани. Опыт разработки аппарата для МГД-генератора позволил Я.П. Калугину впоследствии разработать целое семейство доменных бесшахтных воздухонагревателей, не имеющих аналогов в мире.

Самым важным изобретением Я. П. Калугина стала разработка бесшахтного воздухонагревателя с горелкой на верху купола, названного ВНК, воздухонагреватель Калугина. Первый воздухонагреватель конструкции Калугина построен в 1982 году на Нижнетагильском металлургическом комбинате и эксплуатировался почти 30 лет.

В настоящее время в России, Китае, на Украине, в Индии, Японии, Индонезии, Турции действуют около 200 воздухонагревателей этого типа, 50 аппаратов находятся в стадии проектирования и строительства.

С помощью бесшахтных воздухонагревателей конструкции Калугина производится более 30% российского чугуна, в мире — 10%.

Создал самостоятельную научную школу, которая сейчас сосредоточена в Екатеринбурге фирмой KALUGIN JSC. Имеет 50 авторских свидетельств и 4 патента на изобретения. Автор более 60 печатных работ. Награждён медалью «За трудовую доблесть».

Леонтьев Леопольд Игоревич

Леопольд Игоревич Леонтьев родился 1 декабря 1934 года в Свердловске (ныне Екатеринбург). В 1957 году окончил Уральский политехнический институт по специальности «инженер-металлург». В том же году поступил на работу в Институт металлургии Уральского филиала АН СССР, где прошёл путь от старшего лаборанта до директора института. Академик РАН (1997), член Президиума РАН, директор Института металлургии Уральского отделения РАН. В 1993–96 годах работал первым заместителем Министра науки и технической политики РФ, первым заместителем председателя Комитета РФ по науке и технологиям и Министерства науки и технологий РФ. Работая в Москве совмещал организационную работу с научной деятельностью. В настоящее время является руководителем, созданной им, «уральской научной школы» металлургов. К областям научных интересов Л. И. Леонтьева относятся: физическая химия и технология металлургических процессов, комплексная переработка природного и техногенного сырья, исследования в области состава, структуры и свойств металлов, оксидов, композиционных материалов.

Под его руководством:

- разработаны теоретические основы энерго- и ресурсосберегающих технологий переработки комплексных руд, содержащих железо, ванадий, титан, хром, никель, алюминий, магний и прочие компоненты;
- определены условия образования экологически опасных соединений (оксиды азота, фураны, диоксины) и обоснованы параметры металлургических процессов, минимизирующие образование таких соединений при переработке токсичных материалов;
- разработана и апробирована универсальная технология переработки различного рода отходов с использованием пирометаллургических процессов;
- проведены исследования по переработке металлических фаз в оксидных матрицах.

Л. И. Леонтьев — автор более 400 научных работ и более 80 патентов на изобретения. Под его научным руководством подготовлено 7 кандидатов наук, двое его учеников защитили докторские диссертации.

Награжден орденом Трудового Красного Знамени.

Логинов Валерий Николаевич (20.01.1950 г. р.)

Учеба в МИСиС 1970–1975 гг. В 1975 г. после института поступил в доменный цех в качестве горнового VI разряда ДП-3 ЧерМК. 1976–1977 гг. — диспетчер доменного цеха. 1977—1980 — подручный газовщика, ст. газовщик. 1980–1981 — мастер ДП-4. 1981–1984 — начальник смены доменного цеха. 1984–1985 — зам. начальника по технологии. 1985—1986 — начальник ДЦ (стр-во ДП-5). 1986–1993 — зам. начальника цеха. С марта 1993 — 2010 г. — начальник ДЦ. С 1.12.2010 г. — на пенсии. Награды: орден Дружбы — 27.06.2000, Орден Почета — 11.05.1995, Орден за заслуги перед Отечеством IV степени — 18.07.2006, Почетный металлург — 5.07.2004, Премия правительства Российской Федерации в области науки и техники — 21.03.2002, Премия правительства Российской Федерации в области науки и техники — 27.02.2008.

Некрасов Зот Ильич (26.12.1907–01.12.1990)

Родился 26 декабря 1907 года (8 января 1908 года) в Мелитополе (ныне Запорожская область, Украина) в семье рабочего-железнодорожника. Окончил Днепропетровский металлургический институт (1930). Затем работал в Днепропетровском НИИ металлов. Научные труды молодого учёного с самого начала были посвящены вопросам теории доменной плавки.

С 1938 года работал на кафедре металлургии чугуна в Днепропетровском металлургическом институте. С началом Великой Отечественной войны кафедра была эвакуирована в Магнитогорск. Доцент (1942). Вместе с академиком И. П. Бардиным выезжал на заводы в Нижний Тагил, Магнитогорск и Кузнецк, где учёные консультировали металлургов.

В послевоенные годы с его именем связано обустройство на новом месте, в г. Днепропетровске, и последующее развитие Института чёрной металлургии. В 1950 защитил докторскую диссертацию. Став в 1952 году директором института, Некрасов З.И. приложил максимум усилий, чтобы перебазировать институт из г. Киева, где он тогда находился, в г. Днепропетровск — металлургический центр Украины. З.И. Некрасов был директором Института чёрной металлургии 24 года — до 1976 года.

В 1971–1978 годах возглавлял Днепропетровский научный центр Академии наук УССР Научная деятельность З. И. Некрасова получила широкое международное признание. Много лет он был председателем Комитета по чёрной металлургии Европейской экономической комиссии ООН. Зот Ильич был также членом ряда комитетов и научных советов, деятельность которых касалась решения проблем чёрной металлургии.

Также активно занимался общественной и общественно-политической деятельностью. Как член КПСС — двадцать лет входил в состав Днепропетровского областного комитета партии, неоднократно был делегатом партийных съездов республиканского и союзного уровня. Много раз избирался депутатом городского совета г. Днепропетровска.

В июне 1991 года Институту чёрной металлургии присвоено имя академика З.И. Некрасова. [5]

25 апреля 2016 года Мариупольскому металлургическому комбинату имени Ильича было присвоено имя З.И. Некрасова.

Юсфин Юлиан Семенович (22.07.1934 – 16.05.2015)

Заведующий кафедрой «Руднотермических процессов» Московский институт стали и сплавов (МИСиС)

Юлиан Семенович родился 24 июля 1934 года в городе Нижний Тагил Свердловской области. В 1956 году закончил Московский институт стали и сплавов (МИСиС) по специальности «Металлургия черных металлов» — квалификация инженер-металлург. Под руководством профессора Похвистнева А.Н. защитил кандидатскую диссертацию в 1963.

Обладая блестящими организаторскими и ораторскими способностями. Быстро становится неформальным лидером молодых ученых кафедры. Именно в этот период проведены фундаментальные исследования механизма и кинетики химических реакций и жидкофазного спекания дисперсных оксидных материалов, восстановительных процессов в доменной печи. Одним из первых Ю. С. Юсфин экспериментально установил факт низкотемпературного восстановления моноксидов мар-

ганца, ванадия и других трудновосстановимых элементов газообразным восстановителем, обнаружил явление наследственности свойств железорудных материалов и дал ему теоретическое объяснение. В 1969 году защищает докторскую диссертацию и становится самым молодым доктором наук за всю историю кафедры.

С 1987 года Юлиан Семенович становится заведующим кафедрой и создает собственную научную школу. Автор более 550 опубликованных работ, в том числе 24 книг, из которых — 10 учебников для вузов и 110 патентов и авторских свидетельств на изобретения. Под руководством Ю.С. Юсфина защищены 39 кандидатских диссертаций, при его научной консультации — 3 докторских диссертации. Именно в это время рождаются пионерские работы Ю.С. Юсфина в области ресурсо-экологических проблем — прогнозные расчеты процессов формирования выбросов в металлургических агрегатах, экобалансов производства черных металлов, реакций сравнительной эколого-ресурсной оценки металлургических агрегатов.

Деятельность Ю.С. Юсфина нашла широкое признание в России и за рубежом. Он удостоен звания «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» (1998 г.) и «Почетный металлург России» (2005 г.), является лауреатом премий Президента РФ в области образования (2005 г.) и Правительства РФ в области науки и техники (2008 г.).

В 1994–2000 гг. избран действительным членом Нью-Йоркской Академии наук, Российской инженерной академии и Российской академии естественных наук.

VIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС «МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА — ВЫЗОВЫ XXI ВЕКА»

7–11 ноября 2016 гг. Москва, НИТУ «МИСиС»

VIII Международный конгресс «Металлургия чугуна — вызовы XXI века» проводился в НИТУ «МИСиС» по инициативе Генерального спонсора ГК «МетПром», НП "Русская Сталь», ООО «Корпорация «Чермет»», ФГУП «ЦНИИчермет», ОАО «Черметинформация», ООО «Объединение доменщиков»

На VIII Международном конгрессе «Металлургия чугуна — вызовы XXI века» приняли участие руководители и специалисты (230 участников) отечественных и зарубежных компаний с 11 стран (Россия, Украина, Казахстан, Германия, Люксембург, Франция, Великобритания, Китай и др.). Рассмотрение широкого круга вопросов было осуществлено на 8 сессиях и заслушано 75 докладов и сообщений от представителей 46 отечественных и зарубежных организаций и компаний. Участники конгресса посетили выставку «МЕТАЛЛ ЭКСПО», которая в эти дни проходила на ВДНХ г. Москвы.

Участники VIII Международном конгрессе отметили:

- Стабильные производственные показатели работы коксо-агло-доменного производства в металлургических компаниях России в период с 2010 по 2016 годы. Лучшие показатели по эксплуатации основных объектов в агло-доменном производстве достигнуты на предприятиях ПАО «ЕВРАЗ НТМК», ПАО «НЛМК», ОАО «ММК», ОАО «СЕВЕРСТАЛЬ» ЧерМК.
- Внедряется технология комбинированного дутья с использованием кислорода высоких параметров (3032 %) в горячем дутье с подачей природного газа и пылеугольного топлива на предприятиях ПАО «ЕВРАЗ НТМК», «ЕВРАЗ ЗСМК», ПАО «НЛМК»
- На капитальных ремонтах I разряда и реконструкциях доменных печей используются современные решения по дизайну лещади

и горна с применением микропористых углеродистых материалов и керамических стаканов зарубежных компаний Европы и Азии.

- При проведении капитальных ремонтов III-бис и II разрядов используются технологии по восстановлению проектного профиля доменной печи с использованием неформованных огнеупорных материалов компаний «Calderys», «Seven Reflactoris», «Maerton».
- Применение в зонах с высокими тепловыми нагрузками (заплечики, распар, низ шахты) холодильников с шаровидным графитом и медных холодильников различных конструкций. В проектах используются медные холодильники от компаний «Danieli Corus», «Paul Wurth».
- На современных доменных печах на капитальных ремонтах I и II разрядов проводятся реконструкции литейных дворов с установкой оборудования с гидравлическим приводом для возможности применения неформованных огнеупорных бетонов для желобов и футляров, леточных масс с повышенной стойкостью к разгару ствола и длины летки.
- В проектах систем контроля и управления доменным процессом применяются современные средства измерения, визуализации, хранения и дистанционного способа передачи информации в сети предприятия. Разрабатываются и внедряются АСУ ТП доменным процессом и объектами доменной печи (воздухонагреватели, весовое хозяйство нижней загрузки, БЗУ, установки пылеприготовления и подачи ПУТ в доменные печи). Техническое оборудования АСУ ТП применяются от зарубежных компаний и частично от отечественных производителей. Проектирование систем АСУ ТП, шефмонтаж, наладка и обучение проводится специалистами отечественных организаций и зарубежных компаний. Эксплуатационное обслуживание выполняется в основном специалистами подразделений металлургического предприятия.
- Ведутся разработки математических моделей доменного процесса верхнего уровня с промышленным внедрением по управлению тепловым состоянием доменной плавки в режиме «искусственного интеллекта» и «режиме выработки принятия решения» технологическим персоналом.
- Для производства металлургического кокса на коксохимических производствах России используются добавки глубокой переработки нефти. Синтетический коксующийся уголь (РСС) глубокой переработки нефти обеспечивает получение металлургического кокса с высокими потребительскими свойствами.
- Отработана технология выплавки нодулярных передельных чугунов на доменных печах объема до 1100 м^3.
- Отработана технология выплавки доменного ферромарганца с использованием марганцевого агломерата и получением низкофосфористого фракционированного товарного продукта с содержанием фосфора до 0,18%.
- На предприятиях России, Украины при освоении технологии доменной плавки на комбинированном дутье с использованием пылеугольного топлива требуется рассмотреть вопрос по формированию программ в следующих направлениях:

1. Повышение качественных характеристик агломерата по стабильности химического состава и прочностным параметрам
2. Повышение качественных характеристик металлургического кокса по прочностным параметрам
3. Составу и типу углей для приготовления и вдуванию пылеугольного топлива в доменные печи.
4. Научно-исследовательских и проектных работ по выбору конструкций, типов холодильников фурменной зоны, заплечиков, распара, низа шахты печи; системы подачи охлаждающей воды на холодильники; огнеупорные материалы различных зон печи.

- Ведутся научно-исследовательские, проектные и конструкторские работы по использованию горячих восстановительных газов при производстве чугуна; получению жидких продуктов плавки в агрегатах барботажного типа.

Участники VIII Международного конгресса «Металлургия чугуна — вызовы XXI века» приняли следующие решения:

1. Участники выносят благодарность инициативной группе в лице Генерального спонсора ГК «МетПром», НП “Русская Сталь», ООО «Корпорация «Чермет»», ФГУП «ЦНИИчермет», ОАО «Черметинформация», ООО «Объединение доменщиков» в проведении конгресса и считают необходи-

мым возобновить проведения Международных конгрессов по коксо-агло-доменному производству в Российской Федерации с периодичность 1 раз в 2 года. Следующий Международный конгресс провести в 2018 году.

2. В 2017 году восстановить работу ассоциации специалистов коксо-агло-доменного производства с целью координации деятельности отечественных и международных организаций в Российской Федерации.
3. Металлургические объединения и предприятия, научно-исследовательские и проектные институты и центры, высшие учебные заведения поддерживают восстановления ассоциации и приложат усилия на возобновление ее деятельности в области:
   - повышения производственных и технико-экономических показателей в коксо-агло-доменном производстве;
   - внедрения в производство современных технологических и технических разработок, направленных на повышения качественных показателей продукции, снижения энергетических затрат и улучшения экологической нагрузки;
   - подготовке специалистов профессионального уровня для Черной металлургии.
4. Ассоциации специалистов коксо-агло-доменного производства:
   - для усиления взаимодействия научно-исследовательских и проектных институтов и центров России с промышленными предприятиями отрасли, оказания им технической помощи организовать информационное обеспечение и систематический анализ работы доменных печей;
   - проводить ежегодные совещания руководителей и специалистов металлургических предприятий по обмену опытом работы доменных печей и совершенствованию технологии с привлечением научных организаций в области коксо-агло-доменного производства;
   - привлекать организации занимающиеся производством огнеупорной продукции для участия в конференциях, конгрессах и межзаводских школах доменщиков;
   - подготовить предложения по организации частно-государственного партнерства в направлении развития отечественных технологий и оборудования по энерго-сбережению и энерго-эффективности в коксо-агло-доменном производстве;
   - проработать вопрос создание металлург-машиностроительного консорциума по изготовлению современного оборудования для агло-доменного производства взамен импортного.
5. Учитывая положительный семилетний опыт эксплуатации сухой газоочистки доменного газа на ПАО «Косогорский металлургический завод» (разработчик ООО НПП «Днепроэнергосталь») рекомендовать к внедрение сухую газоочистку доменного газа на металлургических предприятиях России.
6. Отметить большой вклад ЧАО «Днепрогидромаш» (Украина) в новые конструкторские разработки оборудования для агломерационного и доменного производств. Рекомендовать металлургическим предприятиям РФ, Украины, Казахстана привлекать к тендерным процедурам ЧАО «Днепрогидромаш» на разработку и поставку оборудования для агло-доменного производства на условиях «под ключ».
7. Рекомендовать металлургическим предприятиям при рассмотрении систем управления доменным процессом разработки ООО «АКОММ» математических моделей, внедренных на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».
8. Отметить многолетний опыт эксплуатации загрузочного аппарата роторного типа (ЗАО НПКЦ «ТОТЕМ») на доменных печи России, Индии. Рекомендуется руководителям металлургических компаний и комбинатов, начальникам доменных цехов и другим заинтересованным специалистам привлекать к тендерным процедурам ООО «ТОТЕМ» на разработку и поставку отечественного загрузочного аппарата — бесконусное роторное загрузочное устройство (БРЗУ).
9. Энергоэффективность тепловой работы доменных воздухонагревателей существенно улучшается за счет утилизации тепловой энергии продуктов горения. Рекомендуется металлургическим предприятиям РФ, Украины, Казахстана привлекать к тендерным процедурам ЗАО «Калугин» на разработку и поставку компактных систем утилизации тепла при выполнении реконструкцией воздухонагревателей на условиях «под ключ».

10. Ассоциации доменщиков, Ассоциации литейщиков, ОАО «Черметинформация», металлургическим предприятиям России рекомендовать проведение научно-исследовательских и опытно-промышленных испытаний по внедрению в промышленность доменного модифицированного конструкционного чугуна.
11. Отметить многолетний опыт внедрения энергосберегающих горелок Фирмы «Системосервис» и предлагается к применению установка энергосберегающих горелок в торцевой стене арочных кирпичных горнов агломерационных машин.
12. Отметить современный уровень разработок компании Пауль Вюрт для доменного производства — медные плитовые холодильники с металлическими вставками и изогнутыми для полного соответствия профилю ДП; энергосберегающий фурменный прибор сильфонного типа на базе современной теплоизоляции; метод горячего ремонта воздухонагревателей; непрерывный автоматический контроль состояния оборудования БЗУ.
13. НП «Русская Сталь» рассмотреть предложения ФГУП «ЦНИИчермет» по оценке экономической и энергетической эффективности реализации в черной металлургии России энергосберегающих технологий (с ПГ, ПУТ, ГВГ, ПУТ+ГВГ)

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Алфавитный перечень предприятий, компаний и организаций — участников конгресса

Полное наименование	Сокращенное наименование	Страна, город
«Ansteel Group Corporation»		Китай, г. Аньшань
«Danieli Corus»		Нидерланды, г. Эймейден
«Dispopack»		Германия, г. Дюссельдорф
«FERRETTI INTERNATIONAL SRL»		Италия
«GEA Bischoff»		Германия, г. Оельде
«HACH»		Канада, пр. Онтарио
«Magneco»/»Metrel»		США, шт. Иллинойс
«Mayerton Engineering»		Великобритания, г. Олдбе-ри
«Paul Wurth S.A.»		Люксембург, г. Люксембург
«Primetals Technologies»		Великобритания, г. Лондон
«Savoie Refractaires»		Франция
«Saint-Gobain Industrial Ceramics Limited»		Франция, г. Париж
«Seven Refractories»		Россия, г. Санкт-Петербург
«Shandong Metallurgical Design Institute Co»		Китай, г. Цзинань
Представительство АО «Sojitz JECT Corporation»		Япония
«TMT-Tapping Measuring Technology GmbH»	TMT	Германия, г. Зиген
«The University of Science and Technology Beijing»	USTB	Китай, г. Пекин
«АКОММ», ООО	ООО «АКОММ»	Российская Федерация, г. Москва
«Башминералресурс», ООО	ООО «Башминералресурс»	Российская Федерация, г. Уфа
«ВНИПИ САУ-20», ООО	ООО «ВНИПИ САУ-20»	Российская Федерация, г. Москва
«Вулкан-ТМ», ООО НПП	ООО НПП «ВУЛКАН-ТМ»	Российская Федерация, г. Тула
«ДНЕПРОГИДРОМАШ», ЧАО	ЧАО «ДНЕПРОГИДРОМАШ»	Украина, г. Днепропетровск
«Донецкий национальный технический университет»	ДонНТУ	Украина, г. Донецк
«Днепроэнергосталь» ООО НПП	ООО НПП «ДЭС»	Украина, г. Запорожье
«ЕВРАЗ Днепродзержинский КХЗ», ПАО	ПАО «ЕВРАЗ ДнКХЗ»	Украина, г. Днепродзержинск
«ЕВРАЗ Нижнетагильский Металлургический Комбинат», ОАО	АО «ЕВРАЗ НТМК»	Российская Федерация, г. Нижний Тагил

Полное наименование	Сокращенное наименование	Страна, город
«ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», ОАО	АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	Российская Федерация, г. Новокузнецк
Запорожский металлургический комбинат «Запорожсталь», ПАО	ПАО «ЗАПОРОЖСТАЛЬ»	Украина, г. Запорожье
«Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук»	ИМЕТ УрО РАН	Российская Федерация, г. Екатеринбург
«Институт чёрной металлургии имени З.И. Некрасова НАН Украины»	ИЧМ НАН Украины	Украина, г. Днепродзержинск
«Интер-С Групп», ООО	ООО «Интер-С Груп»	Украина, г. Запорожье
«Калугин», ЗАО	ЗАО «КАЛУГИН»	Российская Федерация, г. Екатеринбург
РГП на ПХВ «Карагандинский государственный технический университет» МОН РК	КарГТУ	Казахстан, г. Караганда
«Карбон-Шунгит Трейд», ООО ТД	ООО ТД «КАРБОН-ШУНГИТ ТРЕЙД»	Российская Федерация, г. Екатеринбург
«Кералит», ООО	ООО «КЕРАЛИТ»	Российская Федерация, г. Москва
«КОМТЭД», ООО НПК	ООО НПК «КОМТЭД»	Российская Федерация, г. Екатеринбург
«КОНВЕЛС Автоматизация», ООО	ООО «КОНВЕЛС АВТОМАТИЗАЦИЯ»	Российская Федерация, г. Москва
«Корпорация ЧЕРМЕТ», ООО	ООО «КОРПОРАЦИЯ ЧЕРМЕТ»	Российская Федерация, г. Москва
«Косогорский металлургический завод», ПАО	ПАО «КМЗ»	Российская Федерация, г. Тула
«Липецкий Гипромез», ОАО	ОАО «Липецкий Гипромез»	Российская Федерация, г. Липецк
«Лоза Гмбх», ООО	ООО « Гмбх»	Российская Федерация, г. Домодедово
«М Технология», ООО	ООО «М ТЕХНОЛОГИЯ»	Украина, г. Харьков
«Магнезит», Группа Компаний	ГК «Магнезит»	Российская Федерация, г. Москва
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», ФГБОУ ВО	МГТУ	Российская Федерация, г. Магнитогорск
«Магнитогорский Металлургический Комбинат», ОАО	ОАО «ММК»	Российская Федерация, г. Магнитогорск
«Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича», ЧАО	ЧАО «ММК им. Ильича»	Украина, г. Мариуполь
«Металлургиздат», ООО	ООО «МЕТАЛЛУРГИЗДАТ»	Российская Федерация, г. Москва
«Металлургия и теплотехника», НИИ		Казахстан г. Павлодар
«Метинвест холдинг», ООО		Украина, г. Мариуполь
«МетПром», Группа компаний	ГК МетПром	Российская Федерация, г. Москва
«Механобр-техника», НПК ЗАО	ЗАО НПК «Механобр-техника»	Российская Федерация, г. Санкт-Петербург

Полное наименование	Сокращенное наименование	Страна, город
«ЧМК», ПАО	ПАО «ЧМК»	Российская Федерация, г. Челябинск
«Московский институт стали и сплавов», Национальный исследовательский технологический университет	НИТУ МИСиС	Российская Федерация, г. Москва
«Московский институт стали и сплавов», Новотроицкий филиал Национального исследовательского технологического университета	Новотроицкий филиал Национального исследовательского технологического университета Новотроицкий филиал Национального исследовательского технологического «Московский институт стали и сплавов», Новотроицкий филиал Национального технологического»	Российская Федерация, г. Новотроицк
«Новолипецкий металлургический комбинат», ПАО	ПАО «НЛМК»	Российская Федерация, г. Липецк
«Облпромавтоматика» ОАО	ОАО «Облпромавтоматика»	Российская Федерация, г. Череповец
«Огнеупоры», Богдановичское ОАО	Богдановичское ОАО Богдановичское « Богдановичское»	Российская Федерация, г. Богданович
Объединение предприятий «Укрметаллургпром»	ОП «УКРМЕТАЛЛУРГПРОМ»	Украина, г. Днепр
«ПРОМИНТЕХ НКА», ООО	ООО «ПРОМИНТЕХ НКА»	Российская Федерация, г. Екатеринбург
«Проминтех», ООО	ООО «ПРОМИНТЕХ»	Российская Федерация, п. Балакирево
«Российская академия наук», ФГБУ	РАН	Российская Федерация, г. Москва
«Санкт-Петербургская Электротехническая Компания», ООО НПО	ООО НПО ООО «Санкт-Петербургская ССООО»	Российская Федерация, г. Санкт-Петербург
«Саткинский чугуноплавильный завод», АО	АО «СЧПЗ»	Российская Федерация, г. Сатка
«Северсталь-Проект», ООО	ООО «СЕВЕРСТАЛЬ-ПРОЕКТ»	Российская Федерация, г. Череповец
«Сибирский государственный индустриальный университет», ФГБОУ ВО	ФГБОУ ВО ФГБОУ «Сибирский государственный ССФГБОУ»	Российская Федерация, г. Новокузнецк
«ТАЛС-1» ФИРМА ООО	Фирма «ТАЛС-1»	Российская Федерация, г. Москва
«НПВП ТОРЭКС» ООО	ООО «НПВП ТОРЭКС»	Российская Федерация, г. Екатеринбург
«ТОТЕМ», НПКЦ ЗАО	ЗАО НПКЦ «ТОТЕМ»	Российская Федерация, г. Москва
«Тулачермет», ПАО	ПАО «Тулачермет»	Российская Федерация, г. Тула
«УкрМеталлургпром», Объединение предприятий	Объединение предприятий Объединение УУМ»	Украина, г. Днепр
«Уральская Сталь», АО	АО « Сталь»	Российская Федерация, г. Новотроицк
«Уральский институт металлов», ОАО	УИМ	Российская Федерация, г. Екатеринбург

Полное наименование	Сокращенное наименование	Страна, город
«Уралэлектро», ОАО	ОАО Уралэлектро»	Российская Федерация, г. Екатеринбург
«Фирма Системосервис», ООО	ООО «Фирма Системосервиз»	Украина, г. Кривой Рог
«Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева», РГП	ХМИ им. Ж. Абишева	Казахстан, г. Караганда
«Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», ФГУП	ЦНИИЧЕРМЕТ	Российская Федерация, г. Москва
«Череповецкий Металлургический Комбинат» («Северсталь», ПАО)	ЧерМК	Российская Федерация, г. Череповец
«Черметинформация», ОАО	ОАО «Черметинформация»	Российская Федерация, г. Москва
«Чусовской металлургический завод», АО	АО «ЧМЗ»	Российская Федерация, г. Чусовой
«Южно-Уральский государственный университет», ФГАОУ ВО, НИУ	ЮУрГУ	Российская Федерация, г. Челябинск

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Алфавитный перечень участников конгресса

Ф.И.О. Участника	Наименование организации	Должность
Адамчук А.Н.	ГК МетПром	Директор Департамента по развитию бизнеса
Акбердин А.А.	ХМИ им. Ж. Абишева	Заведующий лабораторией
Аксюшин М.Е.	ЗАО «Калугин»	Начальник отдела оборудования
Алымов Г.И.	ЧАО «ДНЕПРОГИДРОМАШ»	Директор
Алявдин К.А.	ОАО «Липецкий Гипромез»	Начальник доменного отдела
Архипов Е.Н.	ЕВРАЗ НТМК	Начальник проектного института
Архипов П.И.	ТУЛАЧЕРМЕТ	Заместитель начальника аглоцеха
Атасов П.С.	ООО «Лоза Гмбх»	Генеральный директор
Агапов Е.А.	НИТУ МИСиС	Ассистент
Багин А.	Primetals Technologies	Директор московского филиала
Барбасова Т.А.	ЮУрГУ	Доцент кафедры «Автоматики и управления»
Басаев А.А.	ЮУрГУ	Ассистент кафедры «Автоматики и управления»
Безбабный С.Г.	ООО НПП «ДЭС»	Заместитель генерального директора
Беликов И.П.	ООО «Башминералресурс»	Генеральный директор
Беляничев А.Н.	ООО «Северсталь-Проект»	Главный инженер
Бирюков Е.А.	ОАО «Липецкий Гипромез»	Начальник управления технологического проектирования
Бичурин Т.П.	ООО «КОНВЕЛС Автоматизация»	Ассистент инженера по продвижению
Блошкин С.В.	МЕЧЕЛ, ЧМК	Заместитель начальника доменного цеха по технологии
Богданов П.П.	ООО «КОНВЕЛС Автоматизация»	Инженер
Бондаренко А.В.	ГК МетПром	Инженер
Боранбаев Т.Б.	ТОТЕМ	Генеральный директор
Боровик В.Е.	НИТУ МИСиС	Инженер 1 категории
Бочаров А.И.	Mayerton Engineering	Руководитель доменного направления
Бринкманн Й.	Paul Wurth S.A.	Вице-президент по операционной деятельности
Будерчик С.Н.	ДнепроЭнергоСталь	Начальник ТО
Ванг Бинг (Wang Bing)	Shandong Metallurgical Design Institute Co	Заместитель начальника доменного отдела
Васильев Л.Е.	ООО «Метинвест холдинг»	Эксперт
Виноградов А.А.	ООО «М Технология»	Директор
Волков Е.А.	Северсталь, ЧерМК	Старший менеджер по технологии КАДП
Воронцов В.А.	ООО «Лоза Гмбх»	Региональный директор
Вэй Ксимин (Wei Xinmin)	Shandong Metallurgical Design Institute Co	Генеральный директор
Гаврилюк В.И.	ООО «Метинвест холдинг»	Эксперт

Ф.И.О. Участника	Наименование организации	Должность
Галиуллин Т.Р.	Русская Сталь	Председатель комиссии по производству, техническому развитию и образованию
Ганин Д.Р.	Новотроицкий филиал НИТУ МИСиС	Инженер
Ганина М.В.	ГК МетПром	Инженер
Гао Чжэн Кай	USTB	Профессор
Герт-Ян Апелдорн (Gert-Jan Apeldoorn)	Danieli Corus	Директор по маркетингу и продажам
Глазер А.Ю.	GEA Bischoff	Менеджер по продажам
Гончаров Э.В.	Magneco/Metrel	Представитель компании
Горбунов В.Б.	НИТУ МИСиС	Доцент
Горбунов В.В.	Богдановичское ОАО «Огнеупоры»	Заместитель технического директора
Гордон Я.	НАСН	Руководитель группы Восточной Европы
Губанов В.И.	Косогорский МЗ	Технический советник
Гугис Н.Н	Корпорация «Чермет»	Президент
Давидченко В.М.	ООО «Фирма Системосервис»	Директор
Дашевский В.Я.	НИТУ МИСиС	Профессор
Делямуре С.	Danieli Corus	Менеджер по продажам
Дёмкин В.И.	АО «Уральская Сталь»	Начальник цеха
Денисов С.А.	ООО «КОНВЕЛС Автоматизация»	Инженер-исследователь
Дерябин А.А.	Primetals Technologies	Менеджер по сбыту
Джурдан А. (Jourdan A.)	Saint Gobain	Менеджер по рынку доменных печей
Дмитриев А.А.	ЧерМК	Старший менеджер по техническому развитию
Добаев А.С.	ГК МетПром	Начальник отдела
Дунцев Д.Ю.	ООО «Проминтех НКА»	Технический директор
Дышлевич В.Ф.	ГК МетПром	Первый заместитель генерального директора
Ефремов В.Н.	ОАО «Липецкий Гипромез»	Главный инженер
Журавлев А.С.	ООО «Северсталь-Проект»	Главный инженер проекта
Журавлев Д.Л.	СЧПЗ	Директор по производству
Журавлев О.А.	ГК МетПром	Инженер
Заикин Н.А.	ГК МетПром	Инженер
Зайцев В.А.	АО «Уральская Сталь»	Главный аглококсодоменщик
Захаров А.С.	Sojitz JECT Corporation	Ведущий специалист московского представительства
Зверев К.А.	ООО «КОНВЕЛС Автоматизация»	Руководитель отдела ГМК
Зелепукин С.Н.	ГК МетПром	Региональный менеджер
Зражевский А.Д.	УкрМеталлургпром	Генеральный директор
Зубков А.В.	АО «Уральская Сталь»	Главный специалист по аглококсодоменному производству ТУ
Зуккер М.	Primetals Technologies	Генеральный директор
Иванова Е.Х.	ООО «Металлургиздат»	Директор, заместитель главного редактора
Иванча Н.Г.	ИЧМ	Ведущий специалист

Ф.И.О. Участника	Наименование организации	Должность
Ильиных Д.А.	ЕВРАЗ НТМК	Главный специалист по проектированию доменных печей
Истеев А. И.	НИТУ МИСиС	Ведущий эксперт
Ишов А.М.	ЧерМК	Начальник агломерационного цеха
Кадочников М.С.	Mayerton Engineering	Ведущий специалист доменного направления
Калугин М.Э.	ЗАО «Калугин»	Инженер-конструктор
Канин Л.С.	Ansteel Group Corporation	Заместитель директора
Кано С.	Paul Wurth S.A.	Глава представительства в Москве
Карабасов Ю.С.	НИТУ МИСиС	Президент
Каримов М.М.	ЧерМК	Начальник цеха производства чугуна
Кашкаров Е.А.	ММК им. Ильича	Начальник аглопроизводства
Квон С.С.	КарГТУ	Профессор кафедры «Нанотехнологии и металлургии», д.т.н.
Ким А.С.	ХМИ им. Ж. Абишева	Заведующий лаборатории
Киселев М.С.	ГК МетПром	Ведущий инженер
Коверзин А.М.	ЕВРАЗ ЗСМК	Начальник доменного цеха
Козин А.Е.	ГК МетПром	Главный инженер проекта
Колосов А.В.	ММК	Главный специалист НТЦ по АКД производству
Колпаков П.Н.	ЕВРАЗ НТМК	Директор по реализации капитальных проектов дивизиона Урал
Коровников А.Н.	НПК ЗАО «Механобр-Техника»	Директор по продажам оборудования
Косых М.А.	ООО «Проминтех»	Заместитель генерального директора
Кочура В.В.	ДонНТУ	Заведующий кафедрой «Руднотермические процессы и малоотходные технологии», к.т.н., доцент
Крюссманн М.	TMT	Руководитель проекта
Кудрявцева Л.В.	TMT	Представитель
Кузнецов А.В.	ГК МетПром	Директор проекта
Кузнецов А.М.	Енакиевский МЗ	Начальник доменного цеха
Куликов В.Ю.	КарГТУ	Доцент кафедры «Нанотехнологий и металлургии»
Курганов В.А.	ОАО «Черметинформация»	Заместитель директора
Курунов И.Ф.	НЛМК	Главный доменщик
Кучин В.Ю.	ЧерМК	Менеджер по развитию технологии
Лазуткин А.Е.	ГК МетПром	Вице-президент по инжинирингу
Лазуткин С.Е.	ГК МетПром	Первый Вице-президент
Лазуткин С.С.	ГК МетПром	Президент
Лебедев А.Б.	ГК МетПром	Менеджер проекта
Лебедь В.В.	ИЧМ	Научный сотрудник
Леонтьев Л.И.	РАН	Академик РАН
Ли Джун Линг (Li Jun Ling)	Shandong Metallurgical Design Institute Co	Начальник отдел коксохимии
Липатников А.В.	ММК	Ведущий специалист центра математического моделирования и системно-аналитических исследований
Лифар В.В.	ООО «Корпорация ЧЕРМЕТ»	Вице-президент
Лядский М.В.	КМЗ	Мастер доменной печи

Ф.И.О. Участника	Наименование организации	Должность
Ма Пинг Шэнг (Ma Ping Sheng)	Shandong Metallurgical Design Institute Co	Заместитель начальника отдела внешней деятельности
Майстренко Н.А.	АО «Уральская Сталь»	Ведущий специалист
Макналли Р. (McNally R.)	Saint Gobain	Менеджер по рынку доменных печей
Максимов Д.В.	КМЗ	Начальник смены доменного цеха
Манджиев Э.В.	ГК МетПром	Старший инженер
Мансурова Н.Р.	НЛМК	Главный специалист по исследованию железорудного сырья
Марсуверский Б.А.	ООО НПО «Санкт-Петербургская Электротехническая Компания»	Советник
Меркулов А.Е.	ИЧМ	Старший научный сотрудник
Милакова Е.И.	ГК МетПром	Заведующая группой
Миронов К.В.	ЕВРАЗ НТМК	Начальник доменного цеха
Мирошниченко Д.Н.	ММК им. Ильича	Начальник доменного цеха
Мишин Ю.П.	Русская Сталь	Вице-президент
Мищенко И.М.	ДонНТУ	Профессор
Мозер М.	ТМТ	Руководитель проекта
Мурат С.Г.	ВУЛКАН-ТМ	Директор по исследованию и развитию
Набока В.И.	ПАО «Запорожсталь»	Начальник ТУ
Набока Д.А.	КМЗ	Ведущий специалист технического отдела
Нестеров А.С.	ИЧМ	Ведущий специалист
Нетронин В.Н.	ЧерМК	Советник
Нечкин Г.А.	ОАО «Уральский институт металлов»	И.о. заведущего лаборатории подготовки и качества железорудного и минерального сырья
Никитин Г.М.	НИИ «Металлургия и теплотехника»	Директор
Никифоров В.В.	ЕВРАЗ НТМК	Главный специалист (ответственный за реализацию)
Николаев Ф.П.	ЕВРАЗ НТМК	Главный специалист (коксо-доменное производство)
Новоселова О.Н.	ООО «Металлургиздат»	Главный редактор
Овчинникова Е.В.	НИТУ МИСиС	Аспирант
Павлов А.В.	ММК	Заместитель главного металлурга
Пареньков А.Е.	НИТУ МИСиС	Ведущий эксперт
Паршаков В.М.	ООО «АКОММ»	Директор
Паршина И.Я.	ООО «Металлургиздат»	Научный редактор
Пикулев А.А.	МЕЧЕЛ, ЧМК	Заместитель начальника управления по коксоаглодоменному производству ЧелМК
Писмарев К.Е.	ММК им. Ильича	Директор по технологии и качеству
Подгородецкий Г.С.	НИТУ МИСиС	Директор научно-образовательного центра «Инновационные металлургические технологии»
Полинов А.А.	ММК	Начальник доменного цеха
Полишкевич Д.В.	ДНЕПРОГИДРОМАШ	Директор по маркетингу
Полулях Л.А.	НИТУ МИСиС	Ученый секретарь кафедры
Полякова Л.И.	Dispopack	Представитель
Предеин В.В.	ЕВРАЗ НТМК	Главный специалист-электрик

Ф.И.О. Участника	Наименование организации	Должность
Прокопенко А.Ю.	КОНВЕЛС Автоматизация	Генеральный директор
Распопов Г.А.	ГК МетПром	Начальник отдела
Рейнауд ван Лаар	Danieli Corus	Старший технолог по доменному производству
Садрадинов М.Р.	ТД «Карбон-Шунгит Трейд	Директор
Сарекенов К.З.	КарГТУ	Профессор кафедры «Нанотехнологии и металлургии», д.т.н.
Свирепов А.М.	Primetals Technologies	Ведущий менеджер по сбыту
Сергатов В.А.	Фирма Системосервис	Замдиректора
Сергиенко И.А.	Чусовской МЗ	Ведущий инженер ИТЦ
Сибагатуллин С.К.	МГТУ им. Г.И. Носова	Профессор кафедры ТМиЛП
Симоненко А.Н.	Интер-С Групп	Коммерческий директор
Скорый Г.И.	Paul Wurth S.A.	Глава представительства в Украине
Смирнов Н.В.	ГК МетПром	Менеджер проекта
Старостин Д.В.	Уральская Сталь	Специалист ОПП и Д
Стуков М.И.	ПРОМИНТЕХ НКА	Заместитель директора
Султангазиев Р.Б.	ХМИ им. Ж. Абишева	Докторант КарГТУ
Сущенко А.В.	Метинвест холдинг	Главный эксперт по технологии и качеству Металлургический дивизион
Сыртланов Р.Р.	СЧПЗ	Заместитель начальника аглоцеха
Телюпа Г.С.	ГК МетПром	Технический директор
Тихомиров В.М.	НИТУ МИСиС	Доцент кафедры
Титов В.Н.	НЛМК	Начальник отдела аглодоменных технологий технического центра
Тищенко О.М.	Seven Refractories	Генеральный директор (Украина)
Ткач А.Я.	ЧАО «ДНЕПРОГИДРОМАШ»	Главный специалист по аглодоменному производству
Ткаченко В.Ф.	ГК МетПром	Главный специалист
Толстов А.В.	ГК МетПром	Директор департамента поставок
Торохов Г.В.	НИТУ МИСиС	И.О. заведущего кафедрой
Травянов А.Я.	НИТУ МИСиС	Директор института экотехнологий и инжиниринга
Третяк А.А.	ООО Фирма «ТАЛС-1»	Генеральный директор
Уланов А.П.	ВНИПИ САУ 20	Заместитель директора
Фейлер С.В.	ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»	Заведующий кафедрой металлургии черных металлов
Фофанова Е.А.	Paul Wurth S.A.	Директор по развитию бизнеса в России и СНГ
Фролов Ю.А.	ОАО «Уралэлектро»	Советник
Хамиченок В.В.	ЕВРАЗ ЗСМК	Начальник ТУ
Харченко А.С.	МГТУ им. Г.И. Носова	Доцент кафедры ТМиЛП
Хинский Л.Д.	ОАО «Облпромавтоматика»	Генеральный директор
Цыгулев Ю.И.	ООО «М Технология»	Заместитель директора
Чеглов Р.А.	Seven Refractories	Генеральный директор
Чень Кай	Ansteel Group Corporation	Глава представительства
Чернавин А.Ю.	ОАО «Уральский институт металлов»	Заведущий лаборатории доменного производства и металлизации

Ф.И.О. Участника	Наименование организации	Должность
Чернова А.	ООО НПО «Санкт-Петербургская Электротехническая Компания»	Советник директора
Чесноков Ю.А.	ИМЕТ УрО РАН	Временно и.о. директора института
Черноусов П.И.	НИТУ МИСиС	Доцент кафедры
Чижикова В.М.	НЛМК	Главный эколог
Чикишев В.Ю.	ЕВРАЗ НТМК	Менеджер-аналитик проектов
Шалимов С.В.	Sojitz JECT Corporation	Глава представительства в Москве
Шаповалов А.Н.	Новотроицкий филиал НИТУ МИСиС	Доцент
Шатохин К.С.	НИТУ МИСиС	Ученый секретарь
Шварц К.	Paul Wurth S.A.	Вице-президент по коммуникациям
Шевелев Л.Н.	ФГУП ЦНИИЧМ им. И.П. Бардина	Главный научный сотрудник
Шелягович А.В.	ПАО «ТУЛАЧЕРМЕТ»	Главный инженер
Шкурко Е.Ф.	ООО НПК «КОМТЭД»	Генеральный директор
Шнайдер Д.А.	ММК	Старший менеджер Центра математического моделирования и системно-аналитических исследований
Шульга А.А.	ЕВРАЗ ДнКХЗ	Заместитель главного инженера
Щеглов Э.М.	ПАО «ТУЛАЧЕРМЕТ»	Начальник ПТО
Яковлев Ю.В.	ЕВРАЗ НТМК	Заместитель начальника доменного цеха по ТО и РО
Янаков И.А.	СЧПЗ	Начальник доменного цеха