«МЕТАЛЛУРГИЯ ЧУГУНА. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДО 2025 ГОДА»

IX МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС ДОМЕНЩИКОВ

Москва
Издательский дом «Кодекс»

УДК 34.323
ББК 669.162
Д66

Д66 Металлургия чугуна. Перспективы развития до 2025 года. Труды IX Международного конгресса доменщиков. — М.: Издательский дом «Кодекс», 2018. — 600 с.

ISBN 978-5-9909531-8-5

Сборник содержит труды IX Международного конгресса доменщиков «Металлургия чугуна. Перспективы развития до 2025 года». В представленных материалах рассмотрены пути совершенствования существующих технологий доменного производства, методы внедрения альтернативных технологий производства чугуна и железа, вопросы внедрения информационных, экологически чистых и ресурсосберегающих технологий, направленных на повышение качества продукции и эффективности производства по следующим направлениям:

- состояние и прогноз развития коксо-агло-доменного производства в современных условиях;
- теория и технология производства чугуна в доменных печах и других агрегатах;
- подготовка железорудного сырья и технологического топлива;
- информационное обеспечение в доменном производстве;
- конструкции и оборудование основных объектов коксо-агло-доменного производства;
- подготовка инженерных кадров для металлургических производств.

В сборник трудов включены поступившие доклады конгресса. Все статьи представлены в авторской редакции.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов научных, проектных, учебных и производственных организаций и предприятий.

ISBN 978-5-9909531-8-5

СОДЕРЖАНИЕ

От организаторов конгресса 8

Раздел I. СОСТОЯНИЕ И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ КАДП В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ 9

А.А. Третяк, ООО «МСД-КАДП»
Д.Н. Тихонов, ООО «Дидиджи Технолоджис»
В.В. Лифар, ООО «Корпорация ЧЕРМЕТ»
ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО РОССИИ 10

Ю.А. Золотухин, Н.С. Андрейчиков, АО «ВУХИН»
ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ КОКСОВАНИЯ РОССИИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОНЦЕНТРАТОВ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОКСА 18

Ю.А. Фролов, А.А. Марков, А.А. Бородай, Д.М. Осипов, С.В. Репченко, ООО «НПП «Уралэлектра»
ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ АГЛОМЕРАЦИИ — ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ 21

Л.Н. Шевелев, ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»
КОНЦЕПЦИЯ УСТОЙЧИВОГО НИЗКОУГЛЕРОДНОГО РАЗВИТИЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ РОССИИ НА ПЕРИОД 2020—2050 г.г. 29

А.В. Толстов, А.А Грачев, ГК «МетПром»
РЕАЛИЗАЦИЯ EPC-КОНТРАКТОВ В МЕТАЛЛУРГИИ 33

Раздел II. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОБЪЕКТОВ КАДП 39

С.С. Лазуткин, А.Е. Лазуткин, С.Н. Смирнов, ГК «МетПром»
КОНСТРУКЦИИ НОВЫХ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ ПО ПРОЕКТУ ГК «МЕТПРОМ» 40

К. Бодевинг, Ж.Ф. Штумпер, М. Крюсманн, М. Мозер, Е. Абрамс, TMT Tapping Measuring Technology
TMT — НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЛИТЕЙНЫХ ДВОРОВ И ЗОНДОВ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ 48

Г.И. Алымов, Д.В. Полишкевич, М.Н. Роенко, ЧАО «ДГМ ГРУПП»
DHM GROUP: 25 ЛЕТ НА РЫНКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИИ 61

К.В. Покрышкин, АО «ВУХИН»
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ НОВЫХ ОБЪЕКТОВ КОКСОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ 64

А.С. Зайцев, Н.А. Гнатенко, ООО БМЗ «ПРОГРЕСС», г. Киев
В.В. Осипенко., С.В. Семирягин, ООО НПП «ДНЕПРОЭНЕРГОСТАЛЬ», г. Запорожье
ВНЕДРЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ СУХОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ ЗОНЫ СПЕКАНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ МАШИНЫ 70

Раздел III. ТЕХНОЛОГИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ И ТЕНДЕНЦИИ ЕЕ РАЗВИТИЯ 77

С.В. Филатов, А.И. Дагман, В.Н.Титов, ПАО «НЛМК»
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА НА ПАО «НЛМК» 78

К.В. Миронов, А.А.Форшев, АО «Евраз НТМК»
С.А. Загайнов, Б.С. Тлеугабулов, УрФУ им. Б.Н. Ельцина
СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩИХ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ 84

К.В. Миронов, АО «ЕВРАЗ НТМК»
Б.С. Тлеугабулов, Л.Ю. Гилева, В.А. Михалев, УрФУ им. Б.Н. Ельцина
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАВКИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ 91

С.К. Сибагатуллин, А.С. Харченко, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
А.А. Полинов, Д.И. Селезнев, М. Семенюк, ПАО «ММК»
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОСТУПЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ШИХТЫ ПО КРУПНОСТИ ИЗ БУНКЕРА БЗУ В КОЛОШНИКОВОЕ ПРОСТРАНСТВО ПЕЧИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ЗАГРУЗКИ 98

А.А. Буткарев, ОАО «ВНИИМТ»
РЕЗЕРВЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕГО ДУТЬЯ ЗА СЧЕТ ВНЕДРЕНИЯ ПОДСИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМИ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯМИ 107

В.Г. Дружков, И.В. Макарова, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
И.Е. Прохоров, ПАО «ММК»
ПРИЧИНЫ НИЖНИХ ПОДВИСАНИЙ ШИХТЫ В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ И ПУТИ СНИЖЕНИЯ ИХ ВЕРОЯТНОСТИ 112

А.Ю. Чернавин, В.А. Кобылев, Д.А. Чернавин, ООО «ПРОМИНТЕХ-НКА»
ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОКСА, ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ШИХТЫ И РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ 115

Раздел IV. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ. ВНЕДРЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЧЕРНУЮ МЕТАЛЛУРГИЮ 127

Дитер Беттингер (Dieter Bettinger), Харальд Фритшек (Harald Fritschek), Томас Кронбергер (Thomas Kronberger), Мартин Шалер (Martin Schaler), Primetals Technologies Austria
Иоахим Маухарт (Joachim Mauhart), Voestalpine Stahl GmbH
СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА — ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ И ЗНАНИЯМИ 128

Н.А. Спирин, В.В. Лавров, О.П. Онорин, ФГАОУ ВПО «УрФУ»
В.Ю. Рыболовлев, Д.А. Шнайдер, А.В. Краснобаев, ПАО «ММК»
НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩИХ СИСТЕМ В ПИРОМЕТАЛЛУРГИИ (НА ПРИМЕРЕ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА) 137

А.В. Павлов, А.А. Полинов, ПАО «ММК»
Н.А. Спирин, О.П. Онорин, В.В. Лавров, И.А. Гурин, ФГАОУ ВПО «УрФУ»
РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ 145

А.А. Полинов, И.Е. Прохоров, ПАО «ММК»
В.М. Паршаков, ООО «АКОММ»
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
КОНТРОЛЬ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ В КАЧЕСТВЕ «ОБРАТНОЙ СВЯЗИ» ПРИ ВЫБОРЕ РЕЖИМА РАБОТЫ БЗУ 159

В.М. Паршаков, ООО «АКОММ»
А.А. Полинов, Д.А. Шнайдер, И.Е. Прохоров, А.В. Павлов, А.В. Колосов, Д.И. Селезнев, П.Ю. Довженко, ПАО «ММК»
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ КОМПЛКСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОЦЕНКИ ГАЗОДИНАМИКИ, МАССО- И ТЕПЛООБМЕНА И ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ ПАО «ММК» И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ 177

В.М. Паршаков, В.А. Борисенко, ООО «АКОММ»
И.Е. Прохоров, П.Ю. Довженко, ПАО «ММК»
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
НЕПРЕРЫВНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ КАЖДОГО ФУРМЕННОГО ОЧАГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОСЪЕМА И УПРЕЖДАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ НА ЭТОЙ ОСНОВЕ НАГРЕВА ГОРНА И ПРОГНОЗ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ В ЧУГУНЕ 204

Ю.А. Чесноков, ИМЕТ УрОРАН
ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА «ИНТЕРАКТИВНЫЕ РАСЧЕТЫ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ» 210

Д.А. Шнайдер, А.В. Липатников, А.Е. Шмелева, Е.В. Астратова, А.А. Полинов, А.В. Колосов, И.Е. Прохоров, ПАО «ММК»
Т.А. Барбасова, Л.С. Казаринов, ФГАО ВО «ЮУрГУ» (НИУ)
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРВОГО ПЕРЕДЕЛА ПАО «ММК» НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МОДЕЛЬНО-УПРЕЖДАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ 217

С.В. Филатов, А.И. Дагман, ПАО «НЛМК»
С.А. Загайнов, Л.Ю. Гилева, УрФУ
ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ КОМПЛЕКСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОЦЕССОМ 227

Раздел V. ПРОДУКЦИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПАНИЙ ДЛЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ 233

Йенс Ланге, GEA Bischoff
А.Ю. Глазер, GEA Россия
ЭФФЕКТИВНАЯ ГАЗООЧИСТКА С РУКАВНЫМИ ФИЛЬТРАМИ GAE ECOPULS 234

Л.А. Зайнуллин, В.Г. Грезнев, Д.В. Мехряков, ОАО «ВНИИМТ»
УСТАНОВКИ ПРИПЕЧНОЙ ГРАНУЛЯЦИИ ШЛАКА 240

Л.А. Зайнуллин, А.Ю. Епишин, ОАО «ВНИИМТ»
С.В. Филатов, ПАО «НЛМК»
ОХЛАЖДЕНИЕ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ МЕДНЫМИ ХОЛОДИЛЬНИКАМИ 247

Раздел VI. СОВРЕМЕННЫЙ ПРОЦЕСС ПОДГОТОВКИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ И ПУТИ ЕГО РАЗВИТИЯ 253

Г.А. Нечкин, А.Ю. Чернавин, В.А. Кобылев, ООО «ПРОМИНТЕХ-НКА»
А.В. Дьяков, А.А. Одинцов, АО «АрселорМиттал Темиртау»
ОПТИМИЗАЦИЯ АГЛОДОМЕННЫХ ШИХТ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНОЙ ОЦЕНКИ КОМПЛЕКСА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ 254

И.П. Беликов, ООО «БАШМИНЕРАЛ-РЕСУРС»
Г.Е. Исаенко, ПАО «НЛМК»
Г.А. Нечкин, А.Ю. Чернавин, Д.А. Чернавин, В.А. Кобылев, ООО «ПРОМИНТЕХ-НКА»
ОФЛЮСОВАНИЕ ОКАТЫШЕЙ МАРГАНЦОВИСТЫМ ИЗВЕСТНЯКОМ — СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ 263

М.И. Стуков, А.Ю. Чернавин, В.А. Кобылев, Д.А. Чернавин, К.П. Ивашиненко, ООО «ПРОМИНТЕХ-НКА»
КОМПЛЕКС МЕТОДИК И ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ КОКСА И ШЛАКОВ В ЗОНЕ ПЛАВЛЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ 268

Р.В. Петухов, Г.Ю. Витькина, А.Н. Дмитриев, ИМЕТ УрО РАН
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИТАНОМАГНЕТИТОВОГО СЫРЬЯ (ВОССТАНОВИМОСТЬ, «ГОРЯЧАЯ» ПРОЧНОСТЬ, ИНТЕРВАЛ РАЗМЯГЧЕНИЯ) НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ 275

В.И. Носенко, А.Н. Филатов, ООО «Русское горно-химическое общество»
Г.А. Нечкин, В.А. Кобелев, ОАО «Уральский институт металлов»
ПРИМЕНЕНИЕ МАГНЕЗИАЛЬНОГО ФЛЮСА «ФЛЮМАГ М» В АГЛОДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 283

Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, НИТУ «МИСиС»
А.Н. Шаповалов, НФ НИТУ «МИСиС»
РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ УПРОЧНЕНИЯ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ АГЛОМЕРАТОВ НА ОСНОВЕ МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА СПЕКА 288

В.В. Темников, АО «ЕВРАЗ НТМК»
УТИЛИЗАЦИЯ ШЛАКОВ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ В АГЛОПРОИЗВОДСТВЕ 296

Д.Н. Волков, А.Л. Мамонов, А.А. Парфенов, ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат»
ПРОИЗВОДСТВО АГЛОМЕРАТА С СОДЕРЖАНИЕМ ЖЕЛЕЗА 62% 301

В.Г. Дружков, ТМиЛП ФГБОУ ВО «МГТУ»
И.В. Макарова, И.Е. Прохоров, ПАО «ММК»
РАЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЦЕПИ АППАРАТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ПО КРУПНОСТИ АГЛОМЕРАТА 307

В.В. Матлашевский, А.В. Калашников, ООО «Металлургпромснаб»,
В.А. Кобелев, ОАО «Уральский институт металлов»
Г.А. Нечкин, ОАО «Уральский институт металлов», ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет»
КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНВЕРТОРНОГО НИКЕЛЕВОГО ШЛАКА НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ 310

Раздел VII. ПРОЦЕССЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ДЛЯ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА 315

П.В. Чемякин, ЗАО НПП Машпром
Ю.С. Коробов, УрФУ
ОБСЛЕДОВАНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВОК СУХОГО ТУШЕНИЯ КОКСА 316

Ю.С. Коробов, УрФУ
М.С. Девятьяров, Уральский институт сварки-Металлургия
В.С. Козин, НПП «Машпром»
ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ 320

С.Н. Клюкин, ПАО «НЛМК»
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОКСА ОТ ЕГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА 330

Раздел VIII. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА И ЖЕЛЕЗА 335

С.М. Тлеугабулов, Б.С. Тлеугабулов, НАО «Казахский НТУ им. К.И. Сатпаева»
К.Б. Пыхтеева, УрФУ им. Б.Н. Ельцина
ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ ПЛАВКА РУДОУГОЛЬНОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ БЕЗ НАУГЛЕРАЖИВАНИЯ 336

В.Е. Рощин, П.А. Гамов, А.В. Рощин, С.П. Салихов, ФГАО ВО «ЮУрГУ» (НИУ)
ПРЯМОЕ И КОСВЕННОЕ КАРБОТЕРМИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ С ПОЗИЦИИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ 342

Л.А. Зайнуллин, А.Ю. Епишин, В.Г. Карелин, Д.А. Артов, ОАО «ВНИИМТ»
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ С ПОЛУЧЕНИЕМ ЖИДКОГО ЧУГУНА 348

Д.В. Мехряков, ОАО «ВНИИМТ»
С.В. Петров, А.И. Харыбин, АО «ОЭМК»
РЕКОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ № 2 АО «ОЭМК» 352

Раздел IX. ТЕХНОЛОГИИ К ВНЕДРЕНИЮ 357

А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
В.Г. Макиенко, А.И. Истеев, ООО «Азовчерметавтоматика»
Р.В. Стрешнев, ООО «ВНИПИ САУ-2 0»
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА «ГАРАНТ ДП» КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ, РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ СТАБИЛИЗАЦИЮ И ОПТИМИЗАЦИЮ ТЭП, БЕЗОПАСНУЮ РАБОТУ ДП, ПРОДЛЕНИЕ КАМПАНИИ 358

Я.М. Гордон, НАТСН
Н.Н. Изюмский, Г.В. Матвеенко, ОПЧ
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
А.Л. Чайка, Е.Д. Вышинская, НАНУ «ИЧМ»
ПОДСИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ И ОПЕРАЦИОННЫХ ПРАВИЛ В КОКСО-АГЛО-ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 370

Э.М. Манашева, В.Г. Дружков, И.В. Макарова, И.Р. Манашев, ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова»
УВЕЛИЧЕНИЕ СТОЙКОСТИ ЧУГУННЫХ ЛЕТОК КАК ФАКТОРА, СПОСОБСТВУЮЩЕГО ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА..... 376

М.Ю. Ширшов, В.Г. Дружков, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»
И. Е. Прохоров, ПАО «ММК»
ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРЯЧЕГО ДУТЬЯ ПО ФУРМАМ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ 381

ОТ ОРГАНИЗАТОРОВ IX МЕЖДУНАРОДНОГО КОНГРЕССА ДОМЕНЩИКОВ

УВАЖАЕМЫЕ ДАМЫ И ГОСПОДА!

Конгресс доменщиков — это крупнейшее отраслевое мероприятие, в котором принимают участие руководители и специалисты металлургических, коксохимических и машиностроительных предприятий, представители проектных организаций, научно-исследовательских институтов.

В 2018 году организаторами конгресса выступили Международный союз доменщиков (ООО «МСД-КАДП»), Группа компании «МетПром» и АО «ЕВРАЗ НТМК». Генеральный спонсор — Группа компаний «МетПром».

В работе форума, состоявшемся в сентябре 2018 года на базе ЕВРАЗ Нижнетагильского металлургического комбината, приняли участие около 180 руководителей и специалистов в области коксо-агло-доменного производства из России, стран СНГ, Европы и Азии.

На конгрессе участники обсудили пути совершенствования существующих технологий доменного производства, альтернативные технологии производства чугуна и железа, вопросы внедрения экологически чистых и ресурсосберегающих технологий, направленных на повышение качества продукции и эффективности производства. На форуме были рассмотрены результаты реализации инновационных проектов отрасли на крупнейших металлургических заводах.

Помимо пленарных заседаний, в рамках конгресса были заслушаны более 60 докладов по 6-ти секциям: «Альтернативные технологии производства чугуна и железа», «Современный агломерационный процесс и пути его развития», «Процессы повышения качества кокса для доменной плавки», «Пути формирования центров инжиниринговой поддержки российских металлургических компаний», «Продукция для черной металлургии ведущих машиностроительных компаний и заводов по производству огнеупорных материалов», «Внедренные технологии доменной плавки».

В последний день конгресса участники посетили доменную печь № 7 ЕВРАЗ НТМК. Генеральный проектировщик которой Группа компаний «МетПром».

В принятых решениях участники выразили благодарность руководству АО «ЕВРАЗ-НТМК» и ГК «МетПром» за отличную организацию проведения IX Международного конгресса доменщиков; подтвердили высокую значимость форума и подчеркнули необходимость проведения конгрессов на регулярной основе.

Со своей стороны организаторы будут делать все возможное, чтобы конгрессы и в дальнейшем были местом встречи специалистов, где обсуждаются актуальные вопросы отрасли, и каждый участник сможет получить информацию о перспективных разработках и тенденциях развития коксо-агло-доменного производства.

Генеральный директор
ООО «МСД-КДП»
А.А. Третяк

Раздел I
СОСТОЯНИЕ И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ КАДП В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

А.А. Третяк, ООО «МСД-КАДП»
Д.Н. Тихонов, ООО «Дидиджи Технолоджис»
В.В. Лифар, ООО «Корпорация ЧЕРМЕТ»
ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО РОССИИ 10

Ю.А. Золотухин, Н.С. Андрейчиков, АО «ВУХИН»
ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ КОКСОВАНИЯ РОССИИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОНЦЕНТРАТОВ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОКСА 18

Ю.А. Фролов, А.А. Марков, А.А. Бородай, Д.М. Осипов, С.В. Репченко, ООО НПП «Уралэлектра»
ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ АГЛОМЕРАЦИИ — ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ 21

Л.Н. Шевелев, ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»
КОНЦЕПЦИЯ УСТОЙЧИВОГО НИЗКОУГЛЕРОДНОГО РАЗВИТИЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ РОССИИ НА ПЕРИОД 2020–2050 гг. 29

А.В. Толстов, А.А. Грачев, ГК «МетПром»
РЕАЛИЗАЦИЯ EPC-КОНТРАКТОВ В МЕТАЛЛУРГИИ 33

А.А. Третяк, ООО «МСД-КАДП»
Д.Н.Тихонов, ООО «Дидиджи Технолоджис»
В.В. Лифар, ООО «Корпорация ЧЕРМЕТ»

ДОМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО РОССИИ

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Производство чугуна России сосредоточено в 4 регионах:

- Северо-Запад — г. Череповец (ПАО «Северсталь»)
- Центр — г. Липецк (ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»), г. Тула (ПАО «Тулачермет», ПАО «Косогорский металлургический завод»)
- Урал — г. Магнитогорск (ПАО «ММК»), г. Челябинск (ПАО «Челябинский МК»), г. Нижний Тагил (АО «ЕВРАЗ НТМК»), г. Новотроицк (АО «Уральская сталь»), г. Серов (ПАО «Надеждинский металлургический завод»), г. Сатка (АО «Саткинский чугуно-плавильный завод»)
- Западная Сибирь — г. Новокузнецк (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»)

Выплавка стали производится в кислородных конвертерах и дуговых электросталеплавильных печах (97,6%), мартеновских печах (Таблица 1).

Таблица 1. Производство стали в России в 2015–2017 годах [1]

Годы	Общее производство, тыс. т	Конверторная сталь,%	Электро-сталь,%	Мартеновская сталь,%
2015	70800	66,0	32	2
2016	70283,3	66,3	31,9	1,8
2017	71079,7	66,1	31,5	2,4

Основу металлошихты при производстве стали составляет жидкий чугун. Доля в металлошихте конвертеров варьирует в пределах 78–94%, а в электропечах — 30–35%.

Таблица 2. Общее производство чугуна в России в 2011–2017 гг., тыс. т

Годы	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Производство	48102	50437	49976	51401	52371	51995	52277

Производство литейного чугуна и ферромарганца в доменных печах составляло, тыс. т:

Годы	2015	2016	2017
Литейный чугун	298	235	185
Ферромарганец	179	113	144

Основное количество чугуна (более 90%) выплавляется на 8 предприятиях (Таблица 8).

Доменное производство России в 2017 году было представлено 42 доменными печами (ДП), из них 35 печей полезным объемом 1000 м^3 и более (5500м^3 — 1, 4291 м^3 — 1, 3000–3200 м^3 — 4, 2700 м^3 — 1; 2000–2200 м^3 — 10, 1719 м^3 — 1; 1513 м^3 — 3; 1300 — 1386 м^3 — 7; 1000–1144 м^3 — 7) и 7 ДП объемом менее 1000 м^3 (от 205 до 759 м^3).

Доменные печи объемом менее 1000 м^3 используются для выплавки литейных чугунов и ферромарганца, а также передельного чугуна.

Шесть из названных доменных печей в 2017 году находились на консервации. В период с 2008 по 2017 годы 11 доменных печей полностью выведены из эксплуатации.

Таблица 3. Производство чугуна на основных металлургических заводах России в 2015–2017 г.г., тыс. т/ (%)

Годы	Всего по России	ММК	ЧерМК	НЛМК	Евразхолдинг		Мечел	Уральская сталь	Тула-чермет	Другие*
					ЗСМК	НТМК				
2015	52371	10132	9244	12803	5843	4921	4065	2465	2059	840
2016	51995	9652	9317	12689	5414	4832	4053	2963	2254	780
2017	52277 (100)	10163 (19)	9158 (18)	12839 (25)	5586 (11)	4715 (9)	4029 (8)	2686 (5)	2316 (4)	785 (1)

* — КМЗ, НМЗ, САТКИНСКИЙ ЧПЗ

В 2011 г. задута новая доменная печь «Россиянка» (НЛМК) и на ряде печей проведены восстановительные капитальные ремонты.

В стадии реализации на ПАО «НЛМК» проект по окускованию сырья фабрика брикетирования 700 тыс. тонн в год.

Планируется более 7 реконструкции доменных печей.

В настоящее время на ДП применяются 27 конусных загрузочных устройств, 12 БЗУ и 3 роторных загрузочных устройства. Все ДП основных металлургических заводов России оснащены автоматизированными системами управления, выполняющими функции сбора, архивирования, визуализации и обработки информации, стабилизации рудной нагрузки по влажности кокса, управления режимом загрузки и работы воздухонагревателей. На ДП «Россиянка» НЛМК и ДП №5 Северсталь установлена экспертная система «SASHEM».

Шихта большинства ДП состоит из 60–90% агломерата и 10–40% окатышей. Основность агломерата (CaO/SiO_2) составляет от 1,15 до 1,8.

Угольной базой коксохимического производства России являются Кузнецкий, Печерский и Якутский угольные бассейны. Качество кокса на большинстве заводов России на уровне: М25 — 83–87%, М10 — 7–10%, CSR — 40–57%, CRI — 29–35%. НТМК и НЛМК применяет кокс более высокого качества: М25 более 88%, М10–7% и ниже, CSR — выше 60%, CRI — ниже 27%.

Благодаря применению подготовленного сырья, высокой температуре дутья и повышенному давлению газа на колошнике ДП основных металлургических компаний России работают с высокой удельной производительностью и не высоким суммарным расходом топлива (таблица 4), а показатели лучших доменных печей соответствуют мировому уровню. Это обеспечивается оснащенностью ДП средствами технологического контроля и механизации, высокой квалификацией технологического персонала, а также применением на ряде печей технических и технологических инноваций.

Таблица 4. Показатели работы ДП основных металлургических заводов России

Показатели	Годы	ММК	ЧерМК	НЛМК	ЕВРАЗ		Мечел	Урал. сталь	Тула-чермет
					ЗСМК	НТМК			
Производительность, т/м²·сутки	2016	60	71	73	56	71	61	51	54
	2017	63	71	70	57	69	61	49	58
Расход кокса (в т.ч. коксовой мелочи), кг/т	2016	440,8 (26,6)	402,6 (17,0)	373,5 (47,8)	433,1 (41,6)	366,1 (23,9)	456,6 (22,0)	470,9 (38,2)	461,6 (21,3)
	2017	437,9 (28,2)	400,1 (14,3)	358,4 (40,5)	423,5 (40,9)	364,7 (25,4)	455,1 (20,1)	479,2 (39,8)	441,6 (36,7)
Расход ПГ,* кг/т	2016	76,2	84,2	70,5	44,2	77,5	72,5	59,5	44,8
	2017	88,3	82,4	57,2	59,3	83,3	78,6	45,6	44,8
Расход ПУТ, кг/т	2016	–	–	48	29,4	45,3	–	–	–
	2017	–	–	74,4	18,8	41,9	–	–	–
Кокс+ПГ +ПУТ**, кг /т	2016	517	486,8	491,5	506,7	488,9	529,1	530,4	506,4
	2017	526,2	482,5	490,0	501,6	489,9	533,7	524,8	486,4
Температура дутья, °С	2016	1109	1194	1153	1065	1211	1120	1082	1059
	2017	1105	1188	1135	1079	1208	1082	1142	1057
O_2 в дутье,%	2016	26,95	29,57	29,1	25,38	29,5	25,6	23,4	24,11
	2017	27,0	29,66	28,47	25,54	29,3	26,2	21,5	23,91
$P_{колошн}$.,ати	2016	1,34	1,94	1,91	1,4	2,17	1,01	1,5	1,36
	2017	1,43	1,99	1,90	1,5	2,15	1,09	0,95	1,39
Fe в шихте,%	2016	58,32	62,6	57,99	57,04	57,43	57,87	54,4	58,4
	2017	57,8	62,3	57,85	57,2	57,7	57,2	58,5	58,2
Расход ЖРШ (всего), кг/т чугуна	2016	1625,8	1529,6	1656	1700,4	1622,1	1718,7	1801,5	1659,1
	2017	1642,8	1532,3	1646,3	1702,7	1625,8	1678,5	1799,8	1685,4
Доля Ок./Агл./ Ж.Р.***	2016	33/67/–	33/65/2	31/68/1	19/78/3	53/38/9	18/82/–	46/54/–	7/90/3
	2017	38/62/–	32/67/1	33/66/1	20/77/3	52/39/9	20/80/–	42/58/–	8/89/3
[Si]	2016	0,83	0,51	0,45	0,49	0,082	0,54	0,49	0,73
	2017	0,76	0,51	0,47	0,50	0,086	0,52	0,52	0,71
CaO/SiO_2	2016	0,99	0,99	1,02	1,06	1,21	0,93	1,05	1,07
	2017	0,99	1,00	1,03	1,05	1,22	0,92	1,07	1,06

* — значения пересчитаны из расчета: 1м³ — 0,714 кг ПГ (CH_4— «12+4*1/22,4=0,714»).

** — сумма удельных расходов (кг/т) топлив.

*** — передельный чугун, доля руды меньше 0,5% не показана.

Таблица 5. Показатели работы лучших ДП России в 2017 г.

Показатели	Компании и доменные печи (№)			
	ЧерМК	НЛМК	ЗСМК	НТМК
Доменные печи с максимальной производительностью				
Кокс+ПГ +ПУТ, кг /т	483(4)	491,7(7)	506,5(1)	485(5)
Произв-ть., т/м^2·сутки	73,1 (4)	79,2(7)	58,1 (1)	74,7 (5)
Доменные печи с минимальным расходом топлива				
Кокс+ПГ +ПУТ, кг /т	465,1(5)	486,6 (5)	495,6 (3)	485,0 (5)
Произв-ть., т/м^2·сутки	73,0 (5)	61,7 (5)	57,1(3)	74,7 (5)

2. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

Большинство ДП России работают с вдуванием природного газа, поставка которого на металлургические предприятия началась в конце 50-х. Природный газ в течение 10 лет вытеснил другие виды вдуваемых топлив (мазут и ПУТ), стал единственным вдуваемым топливом доменной плавки. Его быстрое внедрение объяснялось простой и дешевой техникой вдувания, низкими эксплуатационными затратами, не высокой ценой, по сравнению с коксом, а также технологичностью природного газа, позволяющей интенсифицировать доменную плавку за счет обогащения дутья кислородом.

В 2013–2017 гг. в России построены четыре системы для подготовки и вдувания ПУТ и возобновлено его вдувание совместно с природным газом на 9 доменных печах НТМК, НЛМК и ЗСМК [1,2].

Приоритет вдувания природного газа в России привел к разработке и внедрению на ДП новых технологий снижающих энергозатраты на выплавку чугуна. К таким технологиям относится вдувание в фурмы газокислородной смеси и подогрев природного газа, вдуваемого в фурмы.

2.1. Вдувание газокислородной смеси в фурмы

Применение газокислородной смеси [3] началось более 20 лет назад на ДП ПАО «Тулачермет». Кроме того, эта технология была внедрена на всех печах АО «ЕВРАЗ НТМК» и на ДП №6 ПАО «НЛМК». Положительный эффект предварительного смешивания природного газа с кислородом заключается в повышении коэффициента замены кокса природным газом за счет обеспечения полноты его сжигания в фурме и в фурменной зоне. Механизм повышения полноты сжигания природного газа при вдувании его в смеси с кислородом заключается в диффузионном окислении природного газа кислородом сразу после их смешивания, которое приводит к повышению температуры смеси в процессе ее движения от смесителя к фурмам. В результате ускоряется воспламенение природного газа, и точка воспламенения его приближается к месту выхода струи газокислородной смеси в поток дутья в канале воздушной фурмы. Все это в совокупности обеспечивает полноту окисления природного газа в фурменной зоне [4]. Безопасное смешивание природного газа с кислородом допускает содержание кислорода в смеси до 25–27%, а заметное повышение коэффициента замены кокса природным газом (на 0,015–0,03 кг/м^3) происходит уже при содержании кислорода в смеси 7–10% [5]. Эффективность применения газокислородной смеси повышается с увеличением расхода природного газа, что особенно заметно при расходах его выше 100 м^3/т чугуна, когда коэффициент замены кокса природным газом увеличивается на 0,035–0,07 м^3/кг.

2.2. Подогрев природного газа

Подогрев вдуваемого газа путем использования его вместо воды в качестве охлаждающей среды для охлаждения фланцев колена и сопла фурменного прибора позволяет повысить его температуру на 100–300 °С и сократить время нагрева газа до температуры воспламенения. В итоге увеличивается объем газа и скорость его истечения из подводящей трубки, улучшая условия смешивания природного газа с дутьем, что приводит к увеличению полноты сгорания природного газа и коэффициента замены им кокса. В итоге расход кокса уменьшается не только за счет уменьшения потерь тепла с охлаждающей водой, но и за счет увеличения коэффициента замены кокса природным газом, причем последняя составляющая экономии кокса превышает первую. Суммарное сокращение расхода кокса за счет подогрева природного газа, при его расходе на одну фурму 350 м^3/час, составляет около 17 кг/т, из которых только 5 кг/т экономится за счет прихода в печь дополнительного тепла с природным газом, а 12 кг/т — за счет повышения коэффициента замены кокса природным газом (на 0,15 кг/м^3). При более высоких расходах природного газа (более 1250 м^3/ч на одну фурму) и при том же двухстадийном его подогреве температура газа повысилась на 100 ^{0}С, а расход кокса снизился на 9 кг/т, из которых 3,5 кг/т — за счет снижения потерь тепла с охлаждающей водой, а 5,5 кг/т — за счет повышения коэффициента замены кокса природным газом (на 0,037 кг/м^3). Подогрев природного газа применяется в настоящее время на ДП ПАО «Северсталь» [6].

2.3. Применение шунгита в шихте доменных печей

Наличие в России значительного по объему разрабатываемого месторождения уникальной горной породы — шунгита, содержащей около 60% SiO_2 и около 30% С, дает возможность доменщикам использовать этот материал для частичной замены им кокса и продления срока службы футеровки горна. Применение шунгита в доменной плавке первоначально осуществлялось с целью частичной замены им кокса при выплавке литейных чугунов. Оценка эффективности замены кокса шунгитом при выплавке литейных чугунов на ряде ДП выявила первоначально необъяснимо высокое значение коэффициента замены кокса шунгитом, который составлял от 0,7 до 1,2 кг/кг, увеличиваясь с повышением содержания кремния в чугуне [7]. Аналогичная зависимость получена и при использовании шунгита при выплавке передельного чугуна, но с меньшим средним коэффициентом замены (0,53 кг/кг при среднем содержании кремния 0,7%) [8]. По последним данным на Челябинском металлургическим комбинате коэффициент замены составил 0,45–0,7 при кремнии 0,5–0,6% [9]. Длительное применение шунгита при этом (более 3 х лет) выявило его влияние на образование гарнисажа на стенках горна [10].

2.4. Применение в шихте брикетированных отходов

В 2012–2017 г.г. в России активно развивается технология брикетирования железосодержащих дисперсных отходов методом жесткой вакуумной экструзии.

Технология экструзии основана на результатах исследования металлургических свойств брикетов и опыта промышленного производства и применения экструзионных брикетов в малой доменной печи на заводе Suraj Products Ltd в г. Руркела (Индия) [11, 12]. Доменная печь на этом заводе более 3 лет работает на шихте из 100% экструзионных брикетов брэксов [12]. Брикеты из железо- и углеродсодержащих отходов на цементной связке по своим металлургическим свойствам пригодны в качестве компонентов доменной шихты. Брикеты экструзионные имеют на выходе из экструдера высокую начальную прочность, обеспечивающую их целостность при транспортировке и перегрузках на пути к площадке для упрочняющего вылеживания. После упрочнения без применения термообратки брикеты имеют высокую холодную и горячую прочность.

Они являются самоплавким и самовосстанавливающимся компонентом доменной шихты, применение которого обеспечивает снижение расхода кокса на выплавку чугуна пропорциональное количеству используемых брикетов. Этому способствует высокая механическая прочность брикетов и ее сохранение в ДП в процессе нагрева и восстановления, благодаря образованию в процессе восстановления

газом и углеродом, содержащимся в брикетах, поверхностного и внутреннего металлического каркаса из восстановленного железа. Допустимая доля таких брикетов в шихте определяется лишь необходимой производительностью печи, которая снижается из-за низкого содержания в них железа.

К 2018 г. в России разрабатываются и эксплуатируются линии для производства экструзионных брикетов:

— Компания «Казхром»: для окускования мелочи хромовой руды и угля и дальнейшего использования компонентом шихты печей постоянного тока;
— Челябинский Электрометаллургический комбинат (ЧЭМК): для окускования марганцеворудной мелочи и пыли аспирации производства силикомарганца.
— НЛМК: ведется строительство фабрики брикетирования на 700 тыс. тонн в год для загрузки в доменные печи. Брикеты будут изготавливать из смеси железорудного концентрата, колошниковой пыли и шламов с цикла мокрой газоочистки доменных печей.

2.5. Воздухонагреватель Калугина

Новой высокоэффективной запатентованной российской технической разработкой в области доменного производства является бесшахтный воздухонагреватель Калугина, который нашел признание и получает все более широкое распространение.

Благодаря эффективному сжиганию топлива в струйно-вихревой форкамерной горелке на куполе, равномерному распределению продуктов горения по сечению насадки и высокой удельной поверхности нагрева, воздухонагреватель Калугина обеспечивает высокотемпературный нагрев дутья (до 1300-1350 °С) при минимальном расходе топлива и при использовании обычных огнеупорных материалов (динас, муллитокорунд, шамот). Минимизации расхода топлива способствует также разработанная система утилизации теплого отходящего газа, которая позволяет за счет подогрева газообразного топлива и воздуха (до 600 °С) получить температуру горячего дутья 1350 °С при использовании в качестве топлива только доменного газа с низкой теплотой сгорания (до 3000 кДж/м^3).

Все эти факторы минимизируют содержание монооксида углерода в отходящих газах новых воздухонагревателей до 20 мг/м^3, что меньше, чем в отходящих газах воздухонагревателей с внутренней или с внешней камерой горения. Воздухонагреватели Калугина за счет устранения камеры горения и применения тонкостенных насадок с увеличенной поверхностью нагрева (до 64 м^2/м^3) имеют меньший объем и высоту и, соответственно, меньшую материалоемкость, что ускоряет их строительство и экономит капитальные затраты по собственно воздухонагревателям на 30–50%. Расчетный безремонтный срок эксплуатации воздухонагревателей Калугина составляет 30 лет, что в несколько раз превышает срок службы традиционных воздухонагревателей. Первый бесшахтных воздухонагреватель проработал без ремонта почти 30 лет и находился в очень хорошем состоянии [13, 14].

Всего на сегодняшний день эксплуатируется более 210 воздухонагревателей в том числе в России — 30, Китае — 125, Индии — 27, Украине — 9, Японии — 5, Казахстане — 3, Индонезии — 3, Турции — 3, Бразилии — 3, Чехии — 1 и еще 40 находятся на стадии проектирования.

Блоки воздухонагревателей Калугина установлены в России на современных печах на ДП: №5, и №6, №7 НТМК; №4 и №5 «Северсталь»; № 1 ММК; №7, №10 и №2, ДП «Россиянка» НЛМК.

2.6. Бесконусное загрузочное устройство с роторным распределителем шихты

Бесконусное загрузочное устройство с роторным распределителем шихты (БРЗУ) реализует принципиально новую технологию загрузки шихтовых материалов в ДП и их распределения по окружности и радиусу колошника.

Результаты исследований на физических моделях и опыт эксплуатации ДП с загрузочными устройствами нового поколения выявили их следующие технические и технологические преимущества по сравнению с двухконусными аппаратами и БЗУ с лотковым распределителем шихты:

— простая конструкция загрузочного устройства и разделение потока выгружаемых из промежуточного бункера материалов на роторный распределитель шихты обеспечивают высокую надежность агрегата и многократно больший срок службы ротора по сравнению с конусом и лотком;

— мягкая укладка шихтовых материалов в печь, достигаемая за счет разделения потока шихты из загрузочного устройства на пять равных потоков, которые в виде широких струй последовательно, друг за другом стекая с плоских лопастей ротора с низкой скоростью, мягко ссыпаются на поверхность засыпи, не деформируя ее;
— высокая равномерность распределения материалов по окружности и их усреднение, обеспечиваемые укладкой каждой порции выгружаемых материалов на поверхность засыпи в 25–50 слоев;
— возможность достигать заданное распределение рудной нагрузки за время загрузки только одной или двух–трех подач без организации больших циклов загрузки, а также за счет возможности загрузки материалов в осевую зону. Это упрощает процесс экспериментального поиска оптимального режима загрузки;
— высокий темп загрузки за счет выгрузки материалов из бункера при полном открытии шихтового затвора, обеспечивающий при необходимости быстрое восстановление упущенного уровня засыпи.

К достоинствам аппарата, вытекающим из его конструктивных особенностей, следует отнести также простоту и надёжность оборудования и, как следствие, минимальные эксплуатационные затраты.

Загрузочными устройствами с роторным распределителем шихты в настоящее время оборудованы все три ДП АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (1989, 1993 и 2008 г.) полезным объемом 2000 м^3 и 3000 м^3 [15]. Еще два загрузочных устройства этого типа эксплуатируется на ДП №2 объемом 1681 м^3 завода JSPL фирмы Jindal и на ДП №3 объёмом 1033 м^3 завода в Бхилаи в Индии [16].

Анализ результатов их работы показал, что после замены конусных загрузочных устройств на БРЗУ производительность печей повышалась на 4–9%, а расход кокса снижался на 4,5–6,5%, причем максимальное улучшение показателей получено на ДП объемом 3000 м^3 и 2000 м^3 [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При общем сокращении доменных печей производство чугуна в России с 2012 г. выросло к 2017 г. на 3,6%. Чугуном в основном обеспечиваются потребности конвертерного и электросталеплавильного производства.
2. Доменное производство России по уровню применяемой технологии находится на достаточно высоком уровне. Парк эксплуатируемых ДП представлен широким диапазоном объемов — от 205 м^3 до 5500 м^3. Печи малого объема используются в основном для выплавки литейных чугунов и ферромарганца.
3. В качестве дополнительного топлива на большинстве ДП применяют природный газ с расходом от 44,8 до 88,0 кг/т (63 и 123,6 м^3/т чугуна). В 2013–2017 гг. в России построены четыре системы для подготовки и вдувания ПУТ и производится его вдувание совместно с природным газом на 9 доменных печах ЕВРАЗ НТМК, НЛМК и ЕВРАЗ ЗСМК.
4. Среднегодовая температура дутья на ДП основных заводов превышает 1100 °С, а на печах с воздухонагревателями Калугина достигает 1211 °С. Содержание кислорода в дутье на ДП находится в диапазоне 21,5–29,66%, а давление газа на колошнике — в диапазоне 0,95–2,17 ати. Среднегодовой суммарный расход топлива на ДП составляет 482–533,7 кг/т, а удельная производительность — 49–73 т/м^2 в сутки.
5. На ДП № 7 НЛМК достигнута высокая удельная производительность 79,2 т/м^2 в сутки, минимальный расход топлива на ДП №5 ЧерМК.
6. Энергосберегающими технологиями, направленными на повышение эффективности использования вдуваемого топлива применяемыми в доменном производстве России являются вдувание газокислородной смеси, подогретого природного газа, совместное вдувание природного газа и ПУТ. Активно развивается ресурсосберегающая технология брикетирования железосодержащих дисперсных отходов методом жесткой вакуумной экструзии. Перспективными техническими разработками России в области доменного производства, несомненно, являются такие агрегаты нового поколения, как безшахтный воздухонагреватель ЗАО «Калугин» и бесконусное загрузочное устройство с роторным распределителем шихты.

Список литературы

1. ITS26-2017 — Производство чугуна, стали и ферросплавов http://docs.cntd.ru/document/556173700 (2017). Данные РОССТАТА.
2. Интернет — официальные сайты российских производителей стали, Информационный сайт hhttp://www.metalinfo.ru.
3. Корнев В.К., Гаспарян В.Е., Тихонов В.Г., Юхименко В.И. О возможности повышения эффективности использования природного газа в доменной плавке // Сталь.1991. №1. С. 7–9.
4. Курунов И.Ф., Торохов Г.В., Корнев В.К. К вопросу об эффективности вдувания в доменные печи газокислородной смеси // Сталь. — 1996. — №5.
5. Kurunov I.F., Kornev V.K., Loginov V.N. Application of the Premix Technology in Blast Furnace. Russian Experience. Proceeding of the 61 th Ironmaking Conference. USA. Nashville. Tennessee. 2002. Pp. 297–311.
6. Kurunov I.F., Feshchenco S.A., Pleshkov V.I. Synergetic Effect of Natural Gas Preheating Prior to Its Injection Into a Blast Furnace. AIST Proceedings / AISTech 2008 5-8 May. Pittsburgh, Pa.,USA
7. Kurunov I., Tuktamyshev Ib., Tuktamyshev Il., Loginov V. Experience of the Shungite Use in the Blast Furnace Process. Reports of the 11th Internatinal Blast Furnace Conference. October 19–21, 2004, Ostrava, Czech Republic.
8. Курунов И.Ф., Яриков И.С., Ляпин С.С., Емельянов В.Л. Опыт промышленного использования шунгита при выплавке передельного чугуна в мощной доменной печи. Сталь. 2003 №7, с. 9–13.
9. Kurunov I., Loginov V., Lyapin S., Polyakov N. New Technological Solutions for the Lining Protection of the Blast Furnace Hearth. Proceedings of the 4th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking. November 26-30, 2006 Osaka, Japan, pp. 543–546.
10. Капнин В.В., Гильманов М.Р., Поляков Н.С. Совершенствование технологии доменной плавки на Челябинском металлургическом комбинате. БНТЭИ «Черная Металлургия», выпуск 4, 2018 г. С. 57–61.
11. Kurunov I.F. et al. Investigation of the metallurgical properties of the Brex. 6th ICSTI. Rio-de-Janeiro, Brazil, (2012). pp.104–113.
12. Kurunov I.F. et al. Modern State of R&D in Stiff Extrusion. 6th ICSTI. Rio-de-Janeiro, Brazil, (2012). pp.104–113.
13. Kalugin Yakov. High-temperature Shaftless Hot Stoves for Blast Furnaces. 6th ICSTI. Rio-de-Janeiro, Brazil, (2012). pp. 2774–2783.
14. Prokofyev B., Kalugina M., et al. METEC, Dusseldorf, (2015).
15. Абрамин Г.В., Боранбаев Б.М., Кошельников А.В., Янковский Д.А. Сталь No.3, 1999, стр. 1–3.
16. Abramin G.V., Boranbaev B.M., Koshelnikov A.V., et al. Steel (1999), pp. 1–3.
17. Boranbaev B.M., Vakulin V.N,. et. al. «Experience of Operating a Rotary Charging Unit at the Bhilai Steel Plant». AIST, Cleveland, Ohio, USA, (2006), pp. 407–416.
18. Boranbaev B.M., et al. «Effect of the charging pattern upon blast furnace performance when a Bell-less rotary charging unit is used». AIST, Pittsburgh, USA. (2008).

Ю.А. Золотухин, Н.С. Андрейчиков, АО «ВУХИН»

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ КОКСОВАНИЯ РОССИИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОНЦЕНТРАТОВ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОКСА

По состоянию на третий квартал 2018 года состояние угольного рынка Российской Федерации достаточно стабилизировалось. По-прежнему ощущается устойчивый профицит по товарным концентратам марки ГЖ, связанный с опережающим развитием добычных мощностей по углям данной марки. За счет недостаточной востребованности углей марки Ж Якутии и ряда угледобывающих предприятий в Кузнецком бассейне также отмечается некоторый профицит по углям этой марки. В связи со значительным снижением требований к качеству производимого кокса (особенно по показателям CSR/CRI) практически исчез дефицит углей марок К и ОС, отличающихся традиционно повышенными коксующими свойствами. Даже наоборот, за счет отсутствия полной реализации концентратов марки К на ряде кузнецких фабрик и за счет ресурсов углей марки К Якутии концентраты этой марки также оказались в профиците. А ресурсов углей марки КС с высоким содержанием в них доли низкометаморфизованных углей производится настолько много, что часть из них приходится в итоге реализовывать на энергетическом направлении. Таким образом, весь угольный рынок на сегодня профицитен по любой марке и нет какой-либо узкой потребности в конкретном угольном сырье, поскольку практически не осталось высококвалифицированных потребителей высокоценных марок углей (Ж, К, ОС), предъявляющих повышенные требования к качеству угольной продукции.

Одной из основных причин снижения требований к качеству угольного сырья для коксования при формировании угольной сырьевой базы коксования практически на всех коксохимических производствах является коммерческий приоритет.

Вторым весьма ощутимым фактором уравновешивания угольного рынка РФ по качественному и некачественному угольному сырью является продолжающееся стремительное ухудшение состояния печного фонда на российских предприятиях (кроме ПАО «НЛМК»). Данный фактор делает бессмысленным использование ценных видов угольного сырья для коксования, так как любое, в том числе даже самое высокоценное сырье, не сможет компенсировать недостатки и дефекты в технологии коксования при производстве кокса даже среднего качества.

Поскольку требования к качеству угольных концентратов для коксования снижается, это приводит к ухудшению контроля над качеством производимых товарных концентратов. Фактор удешевления заставил целый ряд фабрик (особенно работающих на группу компаний НЛМК и ЕВРАЗ) перейти на частичное обогащение с присадкой существенной части перерабатываемого угля в готовый концентрат в необогащенном виде. Для удешевления товарной продукции по этой же причине ряд фабрик занимается систематической присадкой сторонних углей с непредсказуемым качеством в целевой производимый концентрат. Речь идет прежде всего о наиболее ликвидных товарных концентратах марок К и ОС.

Массовое снижение требований к качеству производимого кокса (особенно по показателям CSR/CRI) позволило значительно нивелировать дефицит высокоценных углей (концентратов) марок Ж, К, ОС, а сопутствующее этому ещё и ухудшение состояния коксовых батарей, снижение их производительности позволило в целом существенно снизить спрос на внутреннем рынке на коксующиеся угли. В свою очередь, снижение требований к качеству угольной продукции для коксования и её надлежащего контроля отложило на неопределенный срок реализацию проектов по техническому перевооружению сразу нескольких коксохимических производств и оставило все те нерешенные проблемы по технологии коксования с отсутствием контроля технологии коксования, которые имели и имеют место из-за недостаточной точности дозировки, неправильного складирования и отсутствия объективного управления процессом шихтования. Это приводит, пока эпизодически, к серьезным, даже аварийным ситуациям на коксохимических производствах России. И эти случаи становятся все чаще именно из-за отсутствия контроля технологии коксования и контроля стабильности состава и качества поступающего угольного сырья и готовой шихты в коксовые печи.

А раз нет контроля технологии на большинстве российских заводов, то нет и соответствующей претензионной работы с поставщиками угольных концентратов для коксования. Ведь практически невозможно доказать, что срыв технологического процесса произошел по вине конкретного угольного поставщика, когда даже неизвестен фактический состав шихты на коксование, а объем опробования входного сырья не превышает 20% (наиболее яркие примеры — ПАО «ММК», АО «ЕВРАЗ НТМК», АО «Уральская Сталь»).

На таком фоне текущего состояния отечественной коксохимии даже с учетом того, что сразу на нескольких производствах идет активная подготовка к внедрению технологии коксования трамбованной угольной шихты, дальнейшее развитие угольной отрасли (в части ресурсов для коксования) выглядит довольно туманно.

Уже действующие угольные шахты и разрезы, добывающие уголь для коксования, востребованы далеко не на 100%. Вводимые в ближайшие 5–7 лет угольные объекты будут, в основном, добывать угли марок ГЖО, ГЖ, Ж, которые и сейчас в большом профиците. Новых шахт и разрезов на угли марок КЖ, К, ОС в среднесрочной перспективе не просматривается. Но даже закрытие ряда из них не приведет к возникновению дефицита из-за перекоса рынка в сторону дешевого, малоценного и избыточного по предложению сырья.

В связи с этим АО «ВУХИН», который ведет практически все новые месторождения и угольные объекты, предлагающие свою продукцию для коксования, уже давно рассматривает их не только как поставщика на внутренний рынок, но и на экспорт. Для этого внутри АО «ВУХИН» была разработана своя классификация углей по применимости для отдельных направлений поставок и продолжается постоянная работа по углублению изучения углей новых месторождений России с целью их использования для коксования как на внутреннем, так и на внешнем рынках.

Ведутся работы по изучению углей Фандюшкинского поля (Берингпромуголь), продолжается цикл исследований углей Ургала, Апсата.

Особенно детально изучаются угли шахты «Межегейская», которые при разработанной ВУХИНом технологии обогащения удалось значительно улучшить по коксующим свойствам, что сделало их вполне приемлемыми в отечественных угольных шихтах для коксования и практически нивелировало отрицательный эффект от менее благоприятного химического состава золы (по сравнению с кузнецкими углями марки Ж), что позволило увеличить долю этих углей в шихте для коксования с 3–5% до 12–15%.

АО «ВУХИН» продолжает работы по исследованию и внедрению углей новых месторождений в шихты российских заводов, конечная цель которых — стабилизация и повышение качества кокса при одновременном снижении заготовительной стоимости шихты и себестоимости металла.

Решение таких задач, как внедрение новых углей, технологий; улучшение технико-экономических показателей работы КХП сотрудниками института реально осуществимо на всех без исключения коксохимических площадках РФ.

Ю.А. Фролов, А.А. Марков, А.А. Бородай, Д.М. Осипов, С.В. Репченко, ООО «НПП «Уралэлектра»

ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ АГЛОМЕРАЦИИ — ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

ПОДГОТОВКА ШИХТЫ К СПЕКАНИЮ

Дозирование топлива и возврата

Важнейшим условием поддержания тепловой стабильности процесса спекания шихты является контроль содержания горючего углерода в шихте. Колебания влажности и зольности агломерационного топлива сопровождаются колебаниями прочности и выхода годного агломерата, содержания в нем FeO и восстановимости агломерата.

Как правило, на аглофабриках применяется смесь от трех до пяти видов твердого топлива с разной влажностью (от 6 до 20%) и зольностью (от 12 до 20%). Эта смесь топлив, за редким исключением, не усредняется, а массовое соотношение видов топлива в смеси не соблюдается. При этом влажность смеси топлив определяют не более двух раз в смену.

Очевидно, что оптимальным решением является усреднение смеси топлив. Если это невозможно, необходимо соблюдение графика поступления разных видов топлива в приемные бункера, их распределения и подачи в заданном соотношении на дробление. Но следование даже этим минимальным требованиям в ряде случаев проблематично.

Поэтому необходимо при дозировании топлива в шихту непрерывно измерять его влажность, дозируя топливо по «сухому» весу, хотя и без поправки на зольность. Влажность топлива может быть надежно измерена влагомером, работающим по принципу инфракрасного излучения, так как цвет различных видов топлива отличается несущественно. Влагомер целесообразно устанавливать над ленточным весодозатором топлива.

Оптимальным способом управления тепловым режимом слоя спекаемой шихты и расходом твердого топлива является подержание баланса прихода и расхода «бункерного» (собственного) возврата [1]. Если выход возврата на сходе агломерата с агломашины (при отсутствии «горячего грохота» — с охладителя агломерата) становится выше, чем его приход с шихтой, это указывает на недостаток топлива в шихте.

Кроме бункерного возврата в агломерационную шихту может подаваться отсев агломерата. Если он поступает в дозировочное отделение, то для него целесообразно выделять отдельный бункер. Если все же он загружается в общий бункер с собственным возвратом, то в АСУ ТП необходимо предусмотреть контроль соотношения этих материалов.

При изменении соотношения между расходом возврата и остальной шихты необходимо вводить поправки на расход топлива.

СМЕШИВАНИЕ И ОКОМКОВАНИЕ ШИХТЫ

На аглофабриках РФ, Украины и Казахстана для смешивания и окомкования шихты применяются барабанные аппараты.

Степень заполнения барабанов-смесителей шихтой на агломерационных фабриках с «малыми» агломерационными машинами соответствует проектному уровню и составляет ~18%. По этой причине возможности изменения угла наклона, применения конических вставок в разгрузочном торце барабанов [2] и регулирования частоты вращения с установкой частотно-регулируемых приводов практически отсутствуют.

Степень заполнения шихтой барабанов-смесителей агломерационных машин площадью 312–348 м^2 в РФ и Казахстане находится в пределах от 9 до13% при расходе шихты от 450 до 650 т/ч. При увеличении степени заполнения до проектных 18% время пребывания шихты в барабане возрастет от 40 до 80%. Это позволяет существенно улучшить качество ее смешивания. Данная задача может быть решена тремя способами или их сочетанием:

- уменьшением угла наклона барабана;
- установкой конической вставки в разгрузочном торце барабана;
- уменьшением частоты вращения барабана.

На практике эффективны только первые два варианта или их сочетание, так как уменьшение частоты вращения барабана ухудшит режим смешивания шихты.

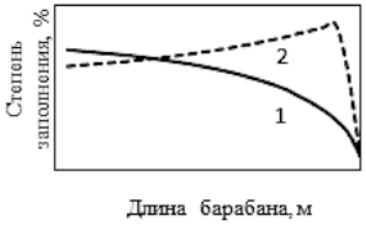


Рис. 1. Характерное (1) и рациональное (2) распределение шихты по длине барабана-окомкователя

Окомкование шихты на агломерационных фабриках, оснащенных агломерационными машинами площадью 312–348 м^2, осуществляют в двух параллельно установленных барабанах-окомкователях при частоте вращения от 4-х до 6-ти об/мин (оптимальная частота 6–7 об/мин). Практическое и рациональное распределение шихты по длине барабанов-окомкователей показано на рисунке 1 [3].

При характерном распределении высота слоя шихты резко снижается в последней трети барабана, в которой происходит уплотнение гранул. При рациональном же распределении шихты высота слоя к концу барабана растет, что способствует упрочнению гранул.

Для реализации такого распределения шихты необходимо рациональное сочетание частоты вращения барабана, угла наклона барабана и установки конической вставки в разгрузочном торце. Но даже при таком сочетании оперативно управлять режимом работы барабана в зависимости от производительности агломерационной машины, состава и влажности шихты возможно только изменением частоты вращения барабанов с помощью частотно-регулируемого привода.

Наибольшее влияние на текущий ход процесса спекания оказывают колебания влажности шихты. В реальных условиях датчики для непрерывного измерения влажности шихты на агломерационных машинах отсутствуют.

Вместе с тем управлять влажностью шихты возможно, используя косвенные параметры. Для оперативного управления расходом топлива, работой барабанов-окомкователей шихты при оптимальной

частоте вращения (6–7 об/мин) и существенного снижения капитальных затрат на строительство агломерационных фабрик, окомкователи шихты следует размещать на нулевой отметке с непосредственным вводом в них зауженного разгрузочного конца барабана-смесителя. При такой схеме возможно отказаться от установки шихтовых бункеров в спекательном отделении.

Для смешивания и окомкования шихты на некоторых зарубежных агломерационных фабриках применяются «интенсивные» смесители. Так на одной из агломерационных фабрик металлургического завода «Драгон Стил» в «интенсивных» смесителях готовят шихту без возврата. Возврат же подают на конвейер после смесителя для снижения интенсивности износа его рабочих органов.

Степень однородности смешивания шихты в «интенсивном» смесителе достигает 95%, в барабанном — 85%. При высокой однородности шихты по гранулометрическому составу исчезает необходимость организации высокой степени сегрегации шихты по высоте слоя, включая распределение топлива. Известно [4], что в результате применения данного оборудования технологи вынуждены измельчать последнее. Передача возврата для смешивания в барабан-окомкователь ухудшает его работу. Данное оборудование имеет высокую стоимость, энергоемкое и затратное в техническом обслуживании.

Вышеназванное оборудование возможно использовать для увлажнения и грануляции пыли агломерационных фабрик. Для этой задачи подходит и более простой и дешевый тарельчатый гранулятор шихты.

ЗАГРУЗКА ШИХТЫ НА АГЛОМАШИНУ

Операция загрузки шихты на агломерационную машину включает формирование слоя шихты в промежуточном бункере челноковым распределителем и укладку постели из агломерата и шихты на колосниковую решетку. Шихта из промежуточного бункера выдается барабанным питателем с частотно-регулируемым приводом.

Работа узла загрузки шихты должна обеспечивать:

- одновременный по ширине слоя подход зоны горения топлива к нижней границе слоя;
- распределение гранулометрического состава шихты и топлива по высоте слоя, при котором максимально компенсируется дефицит тепла в верхней части слоя и ограничивается избыток тепла в его нижней части;
- получение минимальной по абсолютной величине объемной плотности слоя шихты;
- стабильность во времени перечисленных характеристик.

Характерное распределение шихты в промежуточном бункере шириною 4,4 м агломерационной машины АКМ-312 ПАО «НЛМК», измеряемое радарным датчиком, установленном на тележке челнокового распределителя шихты, показано на рисунке 2 [5].

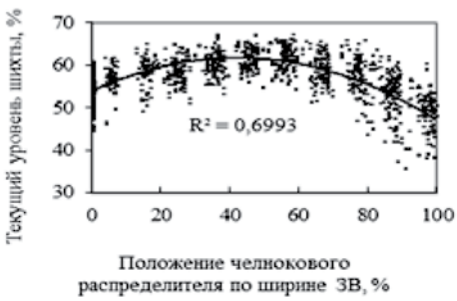


Рис. 2. Характерное распределение шихты в промежуточном бункере агломашины

В проектном режиме работы челнокового распределителя шихты в течение 30 минут из-за сегрегации шихты по высоте загружаемых слоев распределение шихты в промежуточном бункере обусловливает:

- большую концентрацию крупной части шихты у боковых стенок;
- переменную высоту ее слоев;
- неравномерное спекание шихты по ширине и высоте слоя на агломерационной машине.

Таким образом, неравномерность процесса спекания в объеме слоя и по его ширине преимущественно формируется режимом работы челнокового распределителя шихты.

Для оптимизации режима работы челнокового распределителя шихты разработана математическая модель [6]. Согласно результатам исследований на модели, оптимальным является режим работы челнокового распределителя шихты, при котором, наряду с условием постоянства скорости его конвейерной ленты относительно течки с барабана-окомкователя, учитывается фактор накопления шихты на этой ленте в крайнем от течки положении. Разработан алгоритм движения челнокового распредели-

теля шихты. Согласно расчетам по алгоритму конвейерная лента и тележка челнокового распределителя шихты движутся вперед от течки с барабана-окомкователя с меньшей скоростью, а назад — с большей. В результате слои шихты в промежуточном бункере упорядочены и имеют одинаковую высоту (рисунок 3).

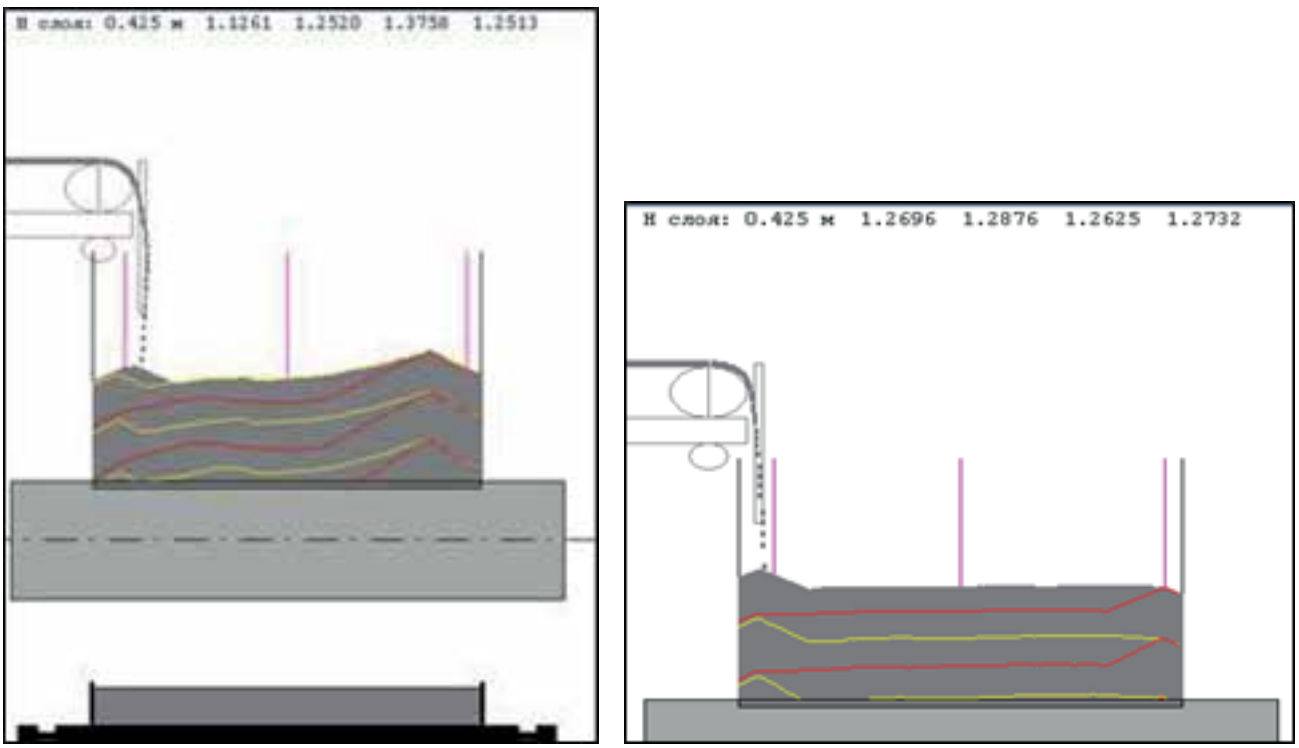


Рис. 3. Распределение слоев шихты в промежуточном бункере агломашины при проектных и оптимальных параметрах работы ЧРШ
Цифры вверху окна: 0,425 — высота слоя шихты на агломашине, м; Первая цифра — высота слоя шихты в крайнем левом положении ЧРШ, м; Цифра 2 — то же, в центре, м; Цифра 3 — то же с правой стороны ЗВ, м; Цифра 4 — средняя высота слоя в ЗВ, м

Для реализации данного режима работы челнокового распределителя шихты необходима установка частотно-регулируемых приводов на его тележку и конвейерную ленту, радарного датчика на тележку челнокового распределителя шихты для сканирования распределения шихты по ширине промежуточного бункера и поддержания заданного уровня шихты.

Потери производительности агломашин из-за неравномерности процесса спекания шихты по ширине паллет достигают 7–9%. Наиболее эффективно выравнивать скорость спекания путем формирования соответствующего профиля слоя по ширине аглоленты с плавным увеличением высоты слоя к бортам паллет с учетом сегрегации шихты по крупности по ширине. Увеличение производительности агломерационной машины в результате реализации этого мероприятия составило 6,7% [3].

Формирование указанного профиля слоя легко реализуется при загрузке шихты с отрывом загрузочного лотка от слоя и соответствующего профиля цельного шибера промежуточного бункера или с помощью секционного шибера.

Контроль равномерности процесса спекания по ширине агломерационной ленты наиболее эффективно осуществлять по распределению температур отходящего из слоя газа в предпоследней вакуум-камере. Для этого следует по ширине этой камеры установить под колосниковой решеткой три термопары, а по ее длине — два ряда термопар.

Мощные агломерационные машины в РФ, Украине и Казахстане до 1990 г. проектировались с использованием двухслойной загрузки шихты на агломашины с возможностью подачи дополнительного количества топлива в верхний слой шихты для компенсации дефицита тепла, обусловленного филь-

трацией «холодного» воздуха в слой после зажигательного горна. Затем эти агломашины (за исключением ЗСМК) были переведены на однослойную загрузку шихты. Практика показала, что при спекании тонкозернистых шихт на основе концентратов для поддержания необходимого уровня сегрегации шихты по высоте слоя по крупности и содержанию топлива, необходима двухслойная загрузка шихты. Она обеспечивает содержание углерода в верхнем слое на 0,8–1,0% (абс.) выше, чем в нижнем слое. Положительный эффект по производительности агломашин после их перевода на однослойную загрузку шихты был получен только на ПАО «НЛМК», где используется хорошо комкующаяся шихта.

ЗАЖИГАНИЕ И СПЕКАНИЕ ШИХТЫ

Режим зажигания шихты должен обеспечивать тепловые и газодинамические условия газопроницаемости слоя спекаемой шихты, получения агломерата с высокими прочностными характеристиками при минимальном расходе твердого и газообразного топлива. При изменении газопроницаемости слоя спекаемой шихты необходимо оперативно принять решение по корректировке скорости аглоленты и/или высоты слоя шихты, не допустив «недопекания» шихты. Параллельно необходимо установить причину изменения газопроницаемости. Необходимо учитывать, что переувлажненная и недоувлажненная шихта оказывает очень близкое по величие негативное влияние на сопротивление слоя.

Результаты комплексного исследования влияния влажности шихты, глубины дросселирования первых вакуум-камер и высоты слоя на параметры процесса спекания с использованием базы данных новой АСУ ТП агломашины № 3 АКМ-312 ПАО «НЛМК» рассмотрены в работах [5, 7].

Установлено, что изменение влажности шихты на ± 0,4% (абс.) приводит к снижению производительности агломерационной машины на ± 7,7–9,4%.

Определять и оптимизировать начальную газопроницаемость слоя шихты и увлажнение шихты в барабане-окомкователе возможно путем использования текущих параметров отходящих газов в дросселируемых вакуум-камерах под зажигательным горном. Между разрежением в первых двух дросселируемых вакуум-камерах и в коллекторе агломашины существует вполне определенное соотношение. При подходе же под зажигательный горн паллет с переувлажненной или недоувлажненной шихтой сопротивление слоя и разрежение в первых вакуум-камерах резко возрастает. В коллекторе же агломерационной машины оно некоторое время остается практически неизменным. При этом время поступления шихты с окомкователя с измененной влажностью на первую вакуум-камеру занимает всего 3–4 мин.

С технологической точки зрения наилучшим решением является регулирование разрежения с помощью дроссельной заслонки. Однако на практике это связано с рядом эксплуатационных проблем.

Для более простого решения задачи в месте выхода патрубка вакуум-камеры следует установить шайбу с профилированным отверстием. В первом случае «нулевое» давление в камере зажигательного горна поддерживается с помощью дроссельной заслонки, а во втором — изменением расхода газа и воздуха при текущем коэффициенте избытка воздуха, поэтому второй способ хотя и несколько менее экономичен, но надежен. В обоих вариантах целесообразна установка уплотнения между второй и третьей вакуум-камерами.

Отклонение влажности шихты характеризуется соответствующим изменением температуры поверхности слоя под горном, обусловленным затратами тепла на испарение влаги (рисунок 4).

Это позволяет использовать данную закономерность, как минимум, для определения отклонения влажности шихты, а при проведении активного эксперимента — и ее регулирования в автоматическом режиме. При недоувлажнении/переувлажнении шихты вместе с изменением сопротивления слоя соответственно изменяется давление в камере горна (рисунок 5).

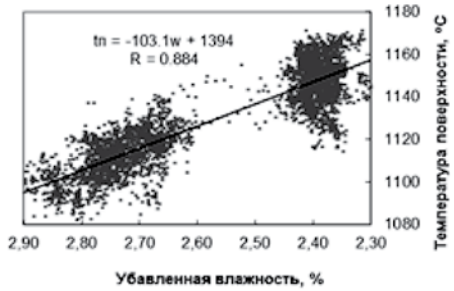


Рис. 4. Влияние снижения влажности шихты на температуру поверхности слоя под зажигательным горном

При отсутствии подсоса воздуха в горн «нулевое» давление горновых газов в камере зажигательного горна обеспечивает баланс их прихода и расхода через слой. Если снижается начальная

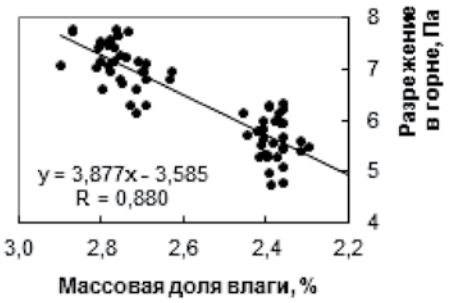


Рис. 5. Изменение разрежения в камере горна при снижении добавленной влажности от «рабочей» 2,8% до 2,4% (абс.) и соответствующего снижения начальной газопроницаемости слоя шихты

газопроницаемость слоя шихты, то необходимо снижать расход газа и воздуха при текущем значении коэффициента избытка α. То есть при текущей температуре горновых газов необходимо сохранять «нулевое» давление в горне.

Если же сопротивление слоя шихты не изменяется, но начинает меняться температура поверхности слоя под горном, то это указывает на недостаток или избыток тепла и, соответственно, топлива в шихте. Это изменение — первый сигнал для регулирования. В этом случае давление газов в камере горна остается постоянным. Для сохранения температуры поверхности слоя необходимо изменять коэффициент α и контролировать баланс возврата.

При любом изменении по знаку газодинамического сопротивления слоя спекаемой шихты скорость фильтрации воздуха через слой (соответственно и вертикальная скорость процесса спекания) стремится восстановить исходное значение. Происходит процесс саморегулирования. При увеличении сопротивление слоя уменьшается расход газа на эксгаустере. Рабочая точка на газодинамической характеристике эксгаустера перемещается к максимуму. В системе растет разрежение под слоем и в коллекторе. Этому способствует и соответствующее снижение температуры отходящих газов. Скорость фильтрации воздуха восстанавливается примерно на 40% от базового значения. Остальные 60% должны быть восстановлены с помощью АСУ ТП спекания путем некоторого снижения высоты слоя шихты или скорости агломерационной ленты. Первый вариант предпочтителен, так как позволяет сохранить постоянный расход шихты, т.е. стабильность процесса спекания.

Установка термопар в вакуум-камерах на первых 60–65% длины агломерационной ленты бесполезна, так как в основном периоде процесса спекания температура отходящих из слоя газов практически не изменяется. Исключение составляет первые две вакуум-камеры, так как в них необходим контроль температуры паллет при остановках агломерационной машины и работе зажигательного горна на «малом газе».

Повышенные подсосы воздуха через торцевое уплотнение разгрузочной части агломашины существенно искажают значения температур в патрубках вакуум-камер: начало снижения максимальной температуры газов может ошибочно приниматься за место завершения процесса горения топлива, хотя это обусловлено подсосами воздуха. Поэтому термопары в трех последних вакуум-камерах следует устанавливать через 1 м по длине непосредственно под колосниковой решеткой.

Кроме того, предпоследней вакуум камере целесообразно дополнительно установить под колосниковой решеткой с обеих сторон термопары на расстоянии ~200 мм от бортов паллет для контроля и обеспечения равномерности распределения температур спекания по ширине слоя.

Установка преобразователя частоты с щитом силовой коммутации и шкафом системы управления для одной агломашины позволит:

- осуществить оптимальное управление процессом спекания на данной агломашине;
- осуществить плавный пуск приводов всех агломерационных машин аглофабрики;
- практически исключить работу эксгаустеров на холостом ходу при остановках агломерационных машин (в настоящее время эксгаустер останавливают после четырех часов работы на холостом ходу);
- существенно снизить расход электроэнергии и увеличить срок службы двигателей эксгаустеров.

ОХЛАЖДЕНИЕ АГЛОМЕРАТА

Управление охлаждением агломерата включает поддержание соотношения между:

- скоростью агломерационной ленты;
- высотой агломерационного спека;
- скоростью полотна охладителя;
- высотой слоя агломерата на охладителе.

При критическом превышении температуры агломерата на сходе с охладителя должна быть предусмотрена задача для АСУ ТП по уменьшению скорости агломерационной ленты. Так как самая горячая часть агломерата (самые крупные его фракции) находится в верхней части слоя при «прямом» способе загрузки агломерата на охладитель достаточно измерять температуру воздуха на выходе из слоя в конце охладителя. При обратном способе загрузки агломерата на охладитель (вверху слоя размещается средняя и мелкая фракция агломерата) эффективно решается вопрос глубокого охлаждения агломерата. Для контроля может применяться этот же способ.

ПОДСИСТЕМЫ АСУ ТП

АСУ ТП агломерации в границах от дозирования компонентов шихты до охлаждения агломерата включает подсистемы, реализующие конкретные задачи контроля и управления.

Рациональный вариант включает следующие подсистемы АСУ ТП:

- дозирование компонентов шихты (включая возврат);
- смешивание, окомкование и загрузка шихты;
- зажигание и спекание шихты;
- охлаждение агломерата.

В принципе возможны и другие варианты распределения подсистем АСУ ТП.

Характеристика, функции и работа АСУ ТП агломерации на примере агломерационных фабрик ПАО «НЛМК» и ПАО «Запорожсталь» рассмотрены в работе [8].

Качество применения АСУ ТП агломерации значительно повысится, а работа технологов облегчится при использовании программы «Советчик агломератчика».

ПРОГРАММА АСУ ТП «СОВЕТЧИК АГЛОМЕРАТЧИКА»

Основными задачами программы АСУ ТП «Советчик агломератчика» являются:

- определение начальной газопроницаемости слоя шихты;
- определение тренда изменения влажности шихты;
- поиск оптимальной влажности шихты по ее минимальному сопротивлению в начальном периоде агломерации;
- определение тренда теплового уровня процесса спекания — недостатка или избытка твердого топлива в шихте;
- определение объемной плотности шихты, загружаемой на аглоленту;
- прогноз места окончания процесса спекания (ВТР точка);
- оперативная выдача рекомендаций (советов) технологу-агломератчику по корректировке влажности шихты и расходу твердого топлива, по скорости агломерационной ленты и высоте слоя шихты.

Использование программы не требует установки дополнительных датчиков и приборов.

Список литературы

1. Каппель, Ф. Автоматическое регулирование содержания топлива в агломерационной шихте [Текст] / Ф. Каппель, З. Игль, Г. Гронмюллер // Черные металлы. — 1964. — № 21. — С. 10–21.
2. 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.
3. Фролов, Ю.А. Агломерация. Технология. Теплотехника. Управление. Экология [Текст] / Ю.А. Фролов. — М.: Металлургиздат, 2016. — 672 с
4. 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 p.

5. Фролов, Ю.А. Исследование процесса агломерации с использованием информации новой АСУ ТП агломерационной машины АКМ-312 ОАО НЛМК [Текст] / Ю.А. Фролов, В.Н. Богатиков, Г.Е. Исаенко [и др.] // Там же. — 2010. — № 5. — С. 24–29.
6. Оптимизация работы челнокового распределителя узла загрузки шихты на агломерационную машину / Полоцкий Л.И., Фролов Ю.А., Исаенко Г.Е., Сапрыкин А.Н. // Труды Междунар. научн.-практ. конф. 11–14 февраля 2009 г. Екатеринбург. УГТУ-УПИ. С. 187–192.
7. Фролов Ю.А., Семенов О.А., Мансурова Н.Р. Практические и теоретические исследования агломерационного процесса на базе НЛМК — история и современность. — Металлург. 2014. № 9. С. 53–59.
8. Фролов Ю.А., Марков А.А., Бородай А.А., Репченко С.В. Состояние и перспективы развития технологии производства агломерата. Часть 13. Технологические и теплотехнические принципы оптимизации АСУТП спекания агломерационной шихты С. 45–57.

Л.Н. Шевелев, д.э.н., ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

КОНЦЕПЦИЯ УСТОЙЧИВОГО НИЗКОУГЛЕРОДНОГО РАЗВИТИЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ РОССИИ НА ПЕРИОД 2020–2050 ГОДЫ

Черная металлургия России относится к числу наиболее энергоемких отраслей промышленности. По данным Национального кадастра выбросов парниковых газов в России на долю черной металлургии приходится почти 60% всех выбросов парниковых газов по промышленности в целом (без предприятий Минэнерго России).

В период действия Киотского протокола (2008–2012 г.г.) в отрасли реализовано 22 проекта совместного осуществления (ПСО). В 2017 г. по сравнению с 1990 г. выбросы парниковых газов в отрасли снизились на 36,7%. Это снижение достигнуто в основном за счет реструктуризации неэффективных мощностей, совершенствования способов производства и разливки стали. Вместе с тем, удельные выбросы парниковых газов на единицу продукции (т CO_2/т стали) в России значительно выше, чем в ЕС и США — соответственно на 15% и 33%. Главные причины: повышенный на 15% удельный расход кокса на производство чугуна (в России — 420 кг/т чугуна, в ЕС — 360 кг/т чугуна); более высокая доля производства конвертерной стали по сравнению с электросталью. В частности, доля конвертерной стали: РФ — 67%, ЕС — 60%; США — 38%. (удельная энергоемкость конвертерной стали примерно в два раза выше, чем электростали: 1,9 т CO_2/т, 0,9 т CO_2/т соответственно).

Для выполнения Россией обязательств по снижению выбросов парниковых газов, принятых в рамках Парижского соглашения по климату, а также достижения более низких показателей удельной энергоемкости по чугуну и стали ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» сформировал концепцию развития черной металлургии на период 2020–2050 г.г.

Целью концепции является ориентация развития черной металлургии России на внедрение прорывных инновационных энергосберегающих технологий, обеспечивающих существенное снижение себестоимости,

повышение энергоэффективности и сокращение выбросов парниковых газов. При этом приоритетное внимание уделяется замене ископаемых видов топлива (кокса и природного газа) не возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), а вторичными энергоресурсами, вырабатываемыми непосредственно на предприятиях отрасли. Такой подход является наиболее эффективным, так как резко сокращает затраты на транспортировку и снижает себестоимость основных видов продукции за счет вычитания из их стоимости затрат на попутные продукты (вторичные энергоресурсы). К числу таких попутных продуктов (вторичных энергоресурсов) относятся, в первую очередь, восстановительные газы $CO+H_2$. Сырьем для восстановительных газов являются собственный доменный газ и дешевые покупные некоксующиеся угли. Восстановительные газы из доменного газа извлекаются путем рециклинга, а из некоксующихся углей — путем их генерации в газогенераторах.

В черной металлургии России наибольшее развитие получила технология с использованием природного газа (ДТ + ПГ), за рубежом — с использованием пылеугольного топлива (ПУТ) и генераторного газа (ГГ). Технико-экономические показатели реализации этих технологий приведены в табл. 1.

Таблица 1. Удельные расходы энергоресурсов на производство чугуна по различным технологиям

№	Показатели	Ед. измерен.	ДТ + ПГ	ПУТ	ГГ
1	Расход кокса	т/т	0,420	0,360	0,290
2	Снижение	%	–	–14,3	–31,0
3	Выбросы CO_2	тCO_2 / т	1,684	1,624	1,599
4	Сокращение	%	–	–3,6	–5,0
5	Энергозатраты	Руб./т	5007	4797	4453
6	Уменьшение	%	–	–4,2	–11,1

Несмотря на значительное снижение расхода кокса в технологиях с использованием ПУТ и ГГ по сравнению с действующей технологией с природным газом (соответственно на 14,3% и 31%), выбросы CO_2 снизились незначительно (соответственно на 3,6% и 5,0%), а энергозатраты соответственно на 4,2% и 11,1%. Это свидетельствует о высоких энергозатратах на производство энергодобавок: пылеугольного таплива и генераторного газа.

Мировой тренд энергосбережения в черной металлургии отдает предпочтение перспективному развитию технологии рециклинга доменного газа и ее совмещению с технологиями ПУТ и ГГ. Результаты расчетов реализации этих технологий приведены в табл. 2.

Таблица 2. Удельные расходы энергоресурсов на производство чугуна с применением технологий рециклинга доменного газа, генераторного газа и рудно-угольных брикетов при производстве чугуна

№	Показатели	Ед. изм.	ДТ + ПГ	ГВГ	ГВГ + ГГ	ГВГ+ГГ+РУБ
1	Расход кокса и угля	т/т	0,420	0,270	0,270	0,389
2	Выбросы CO_2	тCO_2/т	1,848	1.426	1.413	1.026
3	Энергозатраты	Руб/т	5106	4192	4049	3225

Впервые приведены расчеты по совершенно новой технологии, основанной на применении рудоугольных брикетов вместо кокса и железорудного сырья (агломерата, окатышей, железной руды). В состав брикетов входит некоксующийся уголь, железорудный концентрат и цемент (связующее вещество). Стоимость брикетов получается дешевле кокса с железорудным сырьем на 27%, что открывает широкие возможности для развития данной технологии. Энергозатраты в целом снижаются на 37%, а удельные выбросы CO_2 на 44,5%, что является мировым рекордом в энергосбережении черной металлургии.

Существенный прорыв предусматривается в элеуктрсталеплавильном производстве за счет применения новой инновационной технологии ОРИЕН. Суть ее заключается в замене состава шихты: вместо чугуна и стального лома применяются рудоугольные брикеты, содержащие железорудный концентрат,

сбрикетированный с некоксующимся углем. В этом случае стоимость шихты снижается в 1,5 раза, а выбросы CO2 снижаются на 60% по сравнению с конвертерной сталью.

Показатели использования перспективных энергосберегающих технологий в сталеплавильном производстве приведены в табл. 3.

Таблица 3. Удельные расходы энергоресурсов на производство стали с использованием перспективных энергосберегающих технологий в сталеплавильном производстве на металлургических предприятиях с полным циклом производства

№	Показатели	Цена, руб./ед.	Конвертерная сталь		Электросталь ОРИЕН	Электрост. с жидким чугуном
		$К_{эм}$,	ДТ + ПГ	НТ (х)		
1	2	3	4	5	6	7
I	Экономическая эффективность					
1	Энергозатраты	Руб./т	14043	10977	8919	11641
2	Отклонение от базы	Руб./т	–	–3066	–5124	–2402
3	То же	%	–	–21,8	–36,5	–17,1
II	Энергетическая эффективность					
1	Выбросы CO_2	тCO_2/т	1,696	0.942	0.653	0,728
2	Отклонение от базы	тCO_2/т	–	–0,754	–1,043	–0,968
3	То же	%	–	–44,5	–61,5	–57,1

(х) НТ — новые технологии в доменном производстве: ГВГ+ГГ.

Электросталь, выплавляемая по технологии ОРИЕН, имеет наилучшие показатели как по снижению энергозатрат (–36,5%), так и по сокращению выбросов парниковых газов (61,5%) по сравнению с конвертерной плавкой и с электроплавкой с применением жидкого чугуна (20–30%).

Передовые предприятия, работающие с применением 100% стального лома, имеют более низкие показатели по энергозатратам и удельным выбросам парниковых газов, т.е. не нуждаются в переводе на технологию ОРИЕН (производство электростали на них составляет около 15% от общего объема производства стали по отрасли в целом).

Ратификация Россией Парижского соглашения по климату ставит черную металлургию перед новыми рисками. Во-первых, ввод углеродного регулирования выбросов парниковых газов путем обложения их налогом, приведет предприятия отрасли к потере прибыли почти на 100,0 млрд рублей в год. Во-вторых, применением передовыми странами (ЕС, США и др.) углеродного налога на импортируемую металлопродукцию с показателями удельной энергоемкости (тCO_2/т стали), превышающими национальный уровень. Избежать этих рисков можно путем перехода на концепцию устойчивого низкоуглеродного развития с применением прорывных инновационных энергосберегающих технологий и их государственной поддержки (см. табл. 4). К числу таких господдержек относятся налоговые льготы, предусмотренные для высокоэнергоэффективных технологий, включенных в «Перечень» согласно постановления Правительства РФ № 600 от 17.06.2015 г. В этой связи важное значение имеет финансовое обеспечение НИОКР в части разработки бизнес-плана реализации инвестиционных проектов энергосберегающих технологий для включения их в программы развития на 2020–2050 годы.

РЫНОЧНЫЙ МЕХАНИЗМ УГЛЕРОДНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ РОССИИ

Разрабатываемый Минприроды России механизм налогообложения за выбросы парниковых газов путем изъятия через налоги части прибыли металлургических предприятий является весьма обременительным в финансовом отношении и не решает проблему стимулирования снижения выбросов парниковых газов.

Предлагаем рыночный механизм углеродного регулирования выбросов парниковых газов на примере металлургических предприятий путем включения налога в себестоимость продукции (в виде инвестиционных надбавок по статье «Прочие»), с последующим перечислением их в заводские углеродные фонды, накопления этих средств в фондах в течении 2–3 лет (в зависимости от финансового состояния предприяий) и целевого их использования в качестве капиталовложений на финансирование реализации энергосберегающих технологий, включенных в «Перечень» высокоэнергоэффективных технологий согласно Постановления Правительства РФ № 600 от 17.06.2015 г.

Таблица 4. Концепции энергосберегащего развития черной металлургии в развитых странах после 2020 года

№	Страны	Название энергосберегающих концепций	Снижение выбросов в сравнение с 1990 г.,%
1	США	Развитие черной металлургии на основе использования окатышей, полученных технологией прямого восстановления железа с применением сланцевого газа	–75
2	ЕС	Развитие производства чугуна и стали с ультранизкими удельными выбросами парниковых газов	–70
3	Япония	Развитие металлургического производства с использованием технологии рециклинга коксового газа	–65
4	Бразилия	Развитие производства чугуна с использованием биотоплива (замена кокса древесным углем, полученным на основе эвкалиптов)	–60
5	Россия	Энергосберегающее производство чугуна и стали на основе устойчивого низкоуглеродного развития путем внедрения прорывных инновационных энергосберегающих технологий и замены покупных ископаемых видов топлива собственными вторичными энергоресурсами	–80

Такой подход стимулирует предприятия к реализации энергосберегающих технологий и обеспечивает снижение себестоимости на 20%, сокращение выбросов парниковых газов на 50%, снижение выбросов вредных (загрязняющих) веществ на 70%.

А.В. Толстов, А.А. Грачёв, ГК «МетПром»

РЕАЛИЗАЦИЯ EPC-КОНТРАКТОВ В МЕТАЛЛУРГИИ

Группа компаний «МетПром» специализируется на реализации EPC/M-проектов металлургического сектора в России и за рубежом.

«МетПром» был основан в 1992 году и начинал свою деятельность, как инжиниринговая компания. В первые годы своей деятельности компания специализировалась на проектировании объектов доменного производства. И сегодня такие проекты занимают значительную часть в портфеле нашей компании. Так генеральным проектировщиком доменной печи №7 ЕРАЗ НТМК, наиболее современной на сегодняшней день в России, была именно наша компания. В настоящее время ведётся генеральное проектирование ДП №6 ЕВРАЗ НТМК и ДП №3 ПАО «Северсталь». Всего за 26 лет работы ГК «МетПром» реализованы более 50 крупных инвестиционных проектов в индустриальном строительстве.

В числе крупных заказчиков: ArcelorMittal, ПАО «НЛМК», предприятия группы ЕВРАЗ, заводы ПАО «Мечел», ПАО «Северсталь», Исфаханский металлургический завод (Исламская Республика Иран), Хелуанский металлургический завод (Арабская Республика Египет) и многие другие.

Налаженные связи с российскими и зарубежными производителями оборудования и материалов позволяют нам предлагать нашим заказчикам самые передовые технические решения, оптимизированные по параметрам цены и качества, сроков изготовления и условий поставки.

В арсенале ГК «МетПром» реализованные проекты строительства и модернизации объектов для всех циклов металлургического производства.

Успех «МетПром» во многом обусловлен эффективной организацией бизнес-процессов в группе компаний, позволяющей реализовывать

все стадии проекта собственными силами. Сложившаяся практика показала, что только комплексный подход сможет удовлетворить самого взыскательного заказчика. Сегодня в структуру компании входят:

- проектный институт (более 250 сотрудников);
- служба управления проектами (более 100 человек);
- строительно-монтажные организации (более 600 человек).

В настоящий момент компания приступила к реализации собственного проекта по производству металлургического оборудования и технологических металлоконструкций.

ЧТО ТАКОЕ EPC/M

Термин EPC — абривиатура английских слов Engineering, Procurement and Construction, где Engineering — инжиниринг, Procurement — снабжение, Construction — строительство. Таким образом, модель EPC — это реализация инвестиционного контракта «под ключ».

Исходя из вышесказанного, EPC-подрядчик — это исполнитель, который полностью реализует инвестиционный проект и принимает на себя все риски, возникающие в рамках управления проектом с первой (проектирование) до последней стадии (передача объекта заказчику), включая гарантийные обязательства.

Каждый реализуемый проект имеет ряд уникальных характеристик, что зачастую не позволяет с точностью рассчитать итоговую стоимость работ. В этом случае EPC-подрядчик добивается полного выполнения требований заказчика и сохранения контрактной стоимости работ за счет разработки уникальных инженерных и технологических решений, а также схемы управления проектом, позволяющей оптимизировать производственные процессы.

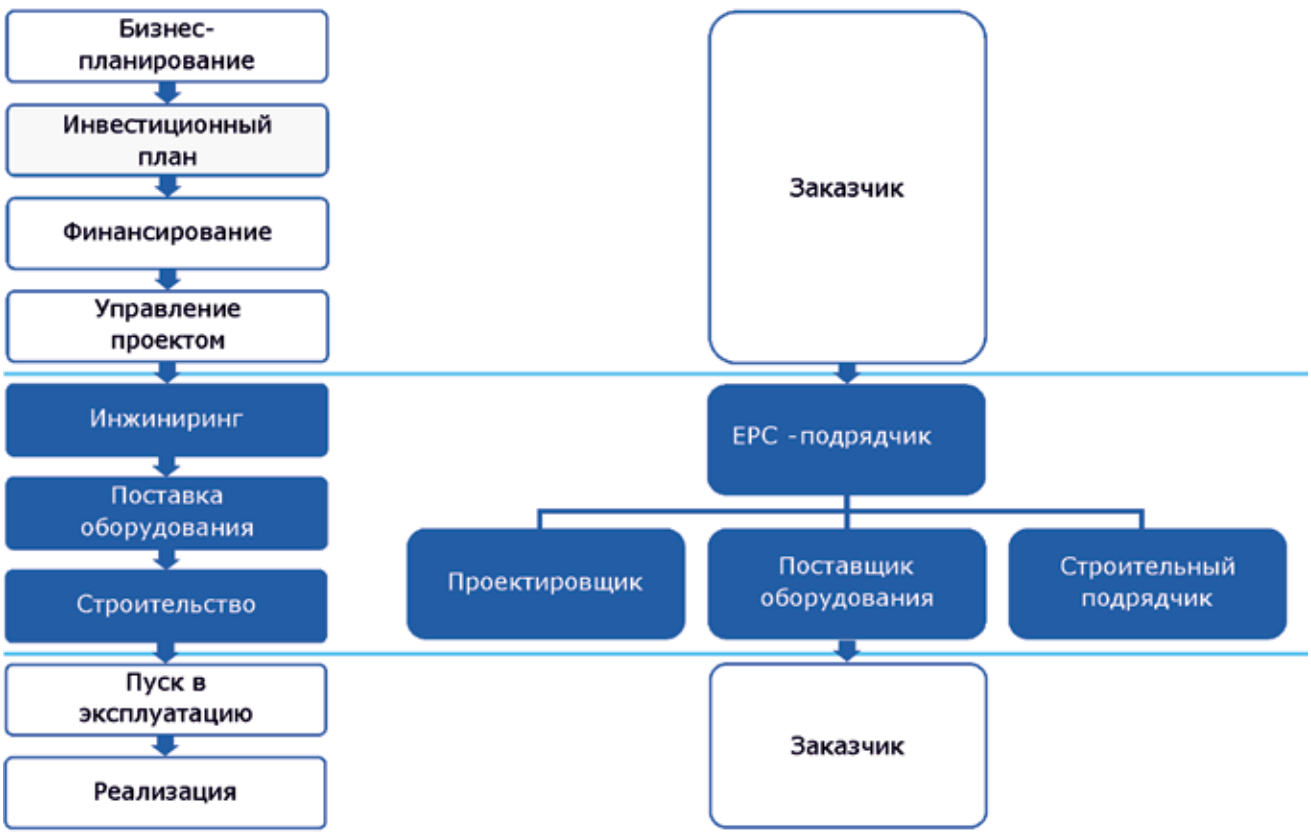


Рис. 1. Классическая структура EPC-контракта

EPCM — аббревиатура английских слов Engineering, Procurement, Construction and Management, где Engineering — инжиниринг, Procurement — снабжение, Construction — строительство, Management — управление.

Основное отличие EPC от EPCM-контракта заключается в том, что при модели EPCM ответственность распределяется между заказчиком и исполнителем, где последний выполняет управленческую функцию, как правило, без использования собственных строительно-монтажных и проектных ресурсов.

Модель EPC/M значительно повышает рентабельность инвестпроекта, во-первых, за счет повышения эффективности управления, так как за все этапы отвечает один подрядчик, во-вторых, за счет снижения сроков и стоимости, поскольку рабочее проектирование и строительство ведутся параллельно в рамках единого управления проектом. Кроме того значительно упрощается и работа с финансовыми институтами за счет минимизации числа участников проекта.

Стоит заметить, что при проектировании каждого металлургического объекта ГК «МетПром» большое внимание уделяет экологической безопасности. Проводится всесторонняя оценка воздействия объекта на окружающую среду, разработка мероприятий по минимизации экологического ущерба. В проектах применяются современные технологии защиты окружающей среды: высокоэффективные системы аспирации, замкнутый водооборотный цикл и многое другое.

Сегодня ГК «МетПром» реализуются два инвестпроекта по модели EPC/M.

Первый, проектирование и строительство (Greenfield) Ташкентского металлургического завода по производству холоднокатаного проката с защитными покрытиями (Республика Узбекистан).

После выхода завода на проектную мощность он будет выпускать 500 тыс. тонн металлопродукции в год, из которых горячеоцинкованного проката 200 тыс. тонн в год, проката с полимерными покрытиями 300 тыс. тонн в год. Ввод завода в эксплуатацию запланирован на IV квартал 2019 года.

ТМЗ имеет важное стратегическое значение для Республики Узбекистан. Ввод в эксплуатацию завода позволит снизить зависимость страны от металлургического экспорта и заметно повысит её индустриальный потенциал.

Второй проект — проектирование и строительство (Greenfield) Миорского металлопрокатного завода по производству жести электролитического лужения (Республика Беларусь).

Проект предусматривает два основных этапа. На первом этапе предполагается строительство завода мощностью 150 тыс. тонн металлопродукции в год, а на втором — расширение производственной мощности завода до 240 тыс. тонн в год. Срок окончания первого этапа строительства III квартал 2019 года, второго — 2020 год.

После ввода в эксплуатацию ММПЗ станет первым в Республике Беларусь заводом по производству белой жести и холоднокатаного проката (листа).

В качестве EPC/M-контрактора ГК «МетПром» выполняет по каждому из проектов следующий комплекс работ:

- проектирование основных производственных линий и объектов инфраструктуры с размещением технологического оборудования;
- проведение тендеров, выбор подрядчиков и поставка технологии производства, основного и вспомогательного оборудования, обеспечивающих стабильный выпуск продукции высокого качества в требуемых объемах при минимизации затрат и расхода сырья, материалов, сменного оборудования и энергоресурсов;
- проведение всех видов строительно-монтажных работ как основного производства, так и объектов инфраструктуры, ответственность за соблюдение сроков и стоимости строительства;
- подготовка и обучение персонала;
- осуществление пуско-наладочных работ и промышленный ввод в эксплуатацию;
- гарантийное и постгарантийное обслуживание

Высокие темпы строительства позволяют говорить о том, что оба проекта будут реализованы в установленные сроки.

ГК «МетПром» предлагает реализацию инвестиционных проектов и по модели EPCM, когда стоимость контракта формируется по принципу «открытой книги» (cost+).

Следует отметить, что ГК «МетПром» может не только осуществить реализацию проекта «под ключ», но и произвести каждый из перечисленных видов работ отдельно или в комплексе в зависимости от потребностей заказчика.

Кроме проектирования и строительства новых заводов мы имеем многолетний опыт реконструкции и модернизации металлургических производств. Применяя современные ресурсосберегающие и экологически чистые технологии, ГК «МетПром» добивается значительного повышения эффективности и производительности объектов.

ПРЕИМУЩЕСТВА EPC/M-КОНТРАКТА

Таким образом, основными преимуществами реализации инвестиционных проектов по модели EPC можно назвать:

- эффективное управление проектом в целом, а не отдельными его стадиями, т.к. подрядчик принимает на себя обязательства не только по выполнению проектных, строительно-монтажных и пуско-наладочных работ, но и по выбору наилучших технологий и оборудования;
- значительное сокращение сроков и стоимости строительства, поскольку рабочее проектирование и строительство ведутся параллельно в рамках единого управления проектом. При этом сроки строительства фиксированы;
- возможность реализации проектов на условиях «fix price» или «cost+»;
- упрощается работа с финансовыми институтами, т.к. число участников проекта минимизировано;
- эффективная схема взаимодействия по принципу «одного окна» и минимальное вовлечение кадровых ресурсов Заказчика.

ЭТАПЫ РЕАЛИЗАЦИИ EPC-КОНТРАКТА ГК «МЕТПРОМ»

Реализация инвестиционного проекта по модели EPC/M ГК «Метпром» включает основные этапы, представленные в Таблице 1.

Таблица 1. Этапы реализации EPC/M-контракта ГК «МетПром»

Период	НАИМЕНОВАНИЕ РАБОТ
Прединвестиционный	**Предпроектные проработки** (технический консалтинг, сбор исходных данных, маркетинговые исследования, обоснование инвестиций, основные технические решения, технико-экономическое обоснование, аудит проектной документации)
Инвестиционный	**Проектно-изыскательские работы** (выполнение инженерных изысканий, разработка проектной и рабочей документации, прохождение экспертизы, авторский надзор)
	Поставка технологий и оборудования (тендерные процедуры по выбору поставщиков основного технологического, вспомогательного оборудования, строительных материалов, размещение заказов)
	Строительно-монтажные работы (выполнение подготовительных, общестроительных, механомонтажных и электромонтажных работ)
	Пуско-наладочные работы (холодные и горячие испытания)
	Обучение персонала
	Ввод объекта в эксплуатацию (подготовка полного пакета исполнительной и эксплуатационной документации, передача и сдача объекта Заказчику)
Эксплуатационный	**Вывод предприятия на проектную мощность**
	Сопровождение гарантийной и постгарантийной эксплуатации

Как видно из Таблицы 1, в рамках EPC/M-контракта ГК «МетПром» берет на себя обязательства по выводу предприятия на проектную мощность, сопровождению гарантийной и постгарантийной эксплуатации, что в классической структуре EPC-контракта не предусмотрено.

СОКРАЩЕНИЕ СРОКОВ РЕАЛИЗАЦИИ EPC-КОНТРАКТА ГК «МЕТПРОМ»

Для реализации каждого инвестиционного проекта очень важны сроки строительства: чем они короче, тем быстрее объект сможет выйти на проектную мощность и, следовательно, тем меньше срок окупаемости проекта. Модель EPC/M — это один из лучших инструментов для достижения этой цели.

Как говорилось выше, сокращение сроков строительства происходит, прежде всего, за счет параллельного проведения рабочего проектирования и строительства, что возможно только в рамках единого управления проектом.

В ГК «МетПром» для реализации каждого EPC/M-контракта создается собственная проектная команда, в которую входят все ключевые исполнители, начиная со стадии предпроектных проработок и до момента выхода предприятия на проектную мощность. Такая схема работы позволяет не только значительно сократить срок реализации проекта, но и формировать технологические, компоновочные, архитектурные и прочие решения с учётом очередности выполнения строительно-монтажных работ, закупок материалов и оборудования, а также дальнейшей оптимальной эксплуатации производства. Постоянная работа на стройплощадке расширенной группы авторского надзора позволяет оперативно вносить необходимые изменения в проектную документацию, что также ведет к сокращению сроков строительства.

Рис. 2. Команда управления EPC-проектом

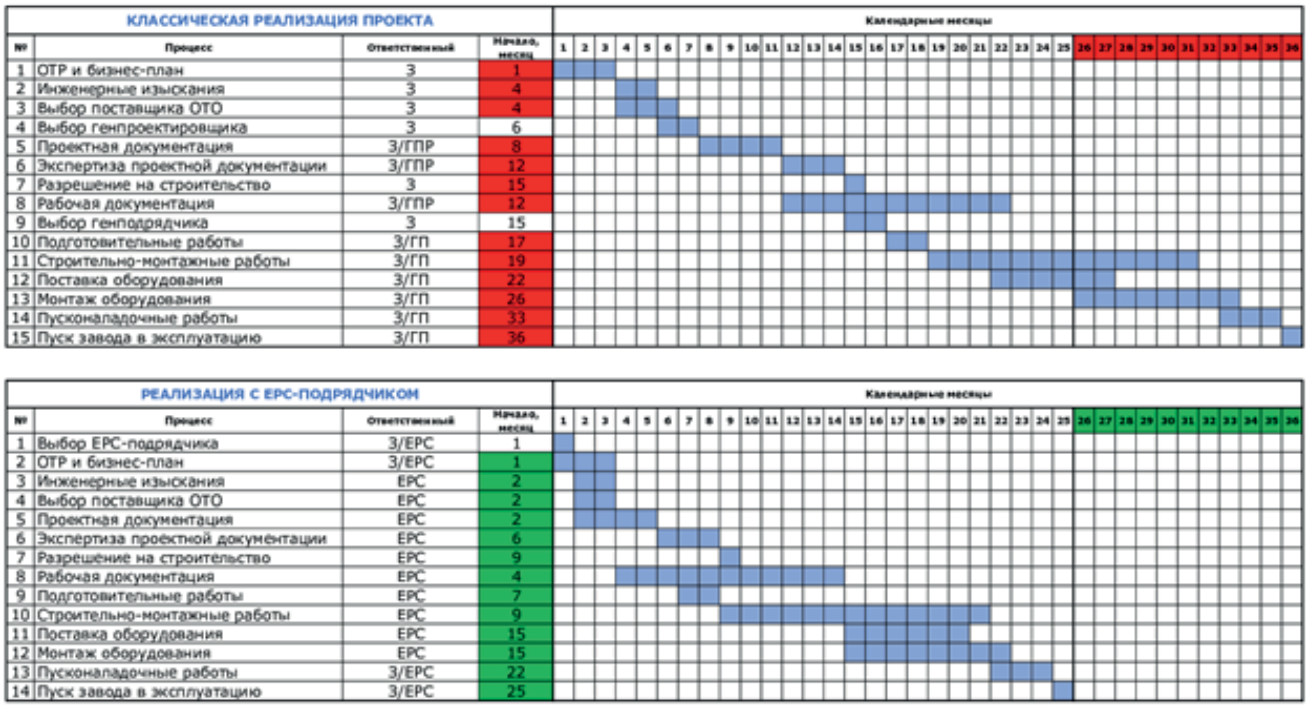
При проектировании мы активно используем технологии цифрового проектирования (BIM-технологии), позволяющие сократить сроки проектирования и строительства, в том числе за счет исключения пересечения различных частей конструкций, ускорения внесения изменений в чертежи и передачи их в «производства работ».

Сегодня в лидеры выходят компании, которые помимо соблюдения сроков и обеспечения эффективности реализации проекта предлагают новые технологические и конструктивные решения, новейшие технологии и «know-how», позволяющие повысить эффективность самого металлургического объекта.

Группа компаний «МетПром» осуществляет постоянный анализ рынка поставщиков технологий и оборудования, благодаря чему может предложить каждому заказчику техническое решение, максимально соответствующее поставленным задачам и оптимизированное по параметрам цены и качества, сроков изготовления и условий поставки.

Немаловажное значение для минимизации сроков реализации проекта имеет и этапность проведения работ. В отличие от многих подрядчиков, ГК «МетПром» приступает к выполнению изысканий на этапе разработки основных технических решений (ОТР), а не на стадии проектирования. На стадии ОТР мы проводим и выбор поставщиков основного и вспомогательного оборудования, что возможно благодаря пониманию конъюнктуры этих рынков. При этом очередность и комплектности поставки

всех видов оборудования проводится совместно с заказчиком до заключения договора с поставщиком. Поэтапное сравнение сроков реализации проекта в классическом виде и по модели EPC приведено на Рис. 3.



КЛАССИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТА

№	Процесс	Ответственный	Начало, месяц
1	ОТР и бизнес-план	З	1
2	Инженерные изыскания	З	4
3	Выбор поставщика ОТО	З	4
4	Выбор генпроектировщика	З	6
5	Проектная документация	З/ГПР	8
6	Экспертиза проектной документации	З/ГПР	12
7	Разрешение на строительство	З	15
8	Рабочая документация	З/ГПР	12
9	Выбор генподрядчика	З	15
10	Подготовительные работы	З/ГП	17
11	Строительно-монтажные работы	З/ГП	19
12	Поставка оборудования	З/ГП	22
13	Монтаж оборудования	З/ГП	26
14	Пусконаладочные работы	З/ГП	33
15	Пуск завода в эксплуатацию	З/ГП	36

Календарные месяцы: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

РЕАЛИЗАЦИЯ С EPC-ПОДРЯДЧИКОМ

№	Процесс	Ответственный	Начало, месяц
1	Выбор EPC-подрядчика	З/EPC	1
2	ОТР и бизнес-план	З/EPC	1
3	Инженерные изыскания	EPC	2
4	Выбор поставщика ОТО	EPC	2
5	Проектная документация	EPC	2
6	Экспертиза проектной документации	EPC	6
7	Разрешение на строительство	EPC	9
8	Рабочая документация	EPC	4
9	Подготовительные работы	EPC	7
10	Строительно-монтажные работы	EPC	9
11	Поставка оборудования	EPC	15
12	Монтаж оборудования	EPC	15
13	Пусконаладочные работы	З/EPC	22
14	Пуск завода в эксплуатацию	З/EPC	25

Календарные месяцы: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

Рис. 3. Сравнение сроков строительства по классической и EPC/M-модели

Следует отметить, что ГК «МетПром» берет на себя полную ответственность за прохождение государственной экспертизы проекта, при этом вовлечение заказчика в процесс подготовки документации минимален.

Преимущества работы с ГК «МетПром» по модели EPC/M

Исходя из всего вышеизложенного, основными преимуществами работы с ГК «МетПром» по модели EPC/M можно назвать следующее:

- минимизация сроков и стоимости реализации проекта за счет одновременного проведения рабочего проектирования и строительно-монтажных работ, т.к. и проектные, и строительные подразделения входят в структуру компании;
- совместная работа групп авторского надзора, строительного контроля, снабжения и эксплуатационной группы на стройплощадке, что позволяет повысить эффективность параллельного проектирования и строительства;
- расширенная группа авторского надзора, постоянно присутствующая на площадке строительства, для оперативного внесения изменений в проектную документацию;
- работа на условиях фиксированной стоимости или по принципу «открытой книги»;
- возможность формирования бюджета проекта на ранней стадии;
- проектирование с учетом материальных ресурсов Заказчика;
- партнёрские отношения с ведущими производителями оборудования и материалов;
- оказание содействия во взаимодействии с финансовыми институтами;
- единый центр ответственности за конечный результат, эффективная модель проектного управления с минимальным уровнем бюрократии;
- вывод предприятия на проектную мощность, сопровождение гарантийной и постгарантийной эксплуатации.

Раздел II
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОБЪЕКТОВ КАДП

С.С. Лазуткин, А.Е. Лазуткин, С.Н. Смирнов, ГК «МетПром»
КОНСТРУКЦИИ НОВЫХ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ ПО ПРОЕКТУ ГК «МЕТПРОМ» 40

К. Бодевинг, Ж.Ф. Штумпер, М. Крюсманн, М. Мозер, Е. Абрамс,
TMT — Tapping Measuring Technology GmbH
TMT — НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЛИТЕЙНЫХ ДВОРОВ И ЗОНДОВ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ..... 48

Г.И. Алымов, Д.В. Полишкевич, М.Н. Роенко, ЧАО «ДГМ ГРУПП»
DHM GROUP: 25 ЛЕТ НА РЫНКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИИ..... 61

К.В. Покрышкин, АО «ВУХИН»
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ НОВЫХ ОБЪЕКТОВ КОКСОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ 64

А.С. Зайцев, Н.А. Гнатенко, ООО БМЗ «ПРОГРЕСС», г. Киев
В.В. Осипенко, С.В. Семирягин, ООО НПП «ДНЕПРОЭНЕРГОСТАЛЬ», г. Запорожье
ВНЕДРЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ СУХОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ ЗОНЫ СПЕКАНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ МАШИНЫ..... 70

С.С. Лазуткин, А.Е. Лазуткин, Н.В. Смирнов, ГК «МетПром»

КОНСТРУКЦИИ НОВЫХ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ ПО ПРОЕКТУ ГК «МЕТПРОМ»

За последние 8 лет после строительства доменной печи № 7 ПАО «НЛМК» «Россиянка» на территории России не было построено ни одной новой доменной печи. Сейчас ситуация стала меняться: дала первый металл доменная печь № 7 АО «ЕВРАЗ НТМК», возобновлено строительство доменной печи № 3 ПАО «Северсталь». Генеральный проектировщик обеих доменных печей — ГК «МетПром».

Хочу отметить, что доменная печь № 7 ЕРАЗ НТМК была построена в рекордно короткие сроки. ГК «МетПром» приступила к проектированию в июне 2016 г., а пуск печи состоялся уже в феврале 2018 г. Таким образом, комплекс доменной печи был построен за 20 месяцев. Достижение столь коротких сроков возможно за счет одновременного проведения рабочего проектирования и строительства, при этом часть работ выполнялась проектной группой непосредственно на площадке.

Основные показатели работы доменной печи приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, на доменной печи достигнуты лучшие в мире показатели удельной производительности с м^2 горна, что стало возможно за счет внедрения передовых конструктивных решений, разработанных ГК «МетПром».

При выполнении проекта специалисты ГК «МетПром» работали в тесном сотрудничестве с рабочей группой строительства и эксплуатационным персоналом АО «ЕВРАЗ НТМК», что позволило оптимизировать технологические параметры печи и снизить стоимость строительства до минимально возможных размеров для печи такого объема.

Таблица 1. Основные показатели работы доменной печи №7 АО «ЕВРАЗ НТМК»

Наименование показателя	Проектные данные
Объем доменной печи(до летки), м^3	2200
Объем доменной печи(до фурм), м^3	1924
Диаметр горна, м	9,8
Производительность, т/сутки	7200
Температура дутья, °С	1250
Давление под колошником, МПа (изб)	0,23
Содержание кислорода в дутье, %	31
Расход кокса, кг/т (с технологией вдувания ПГ и ПУТ)	320
Отсев кокса, кг/т	30
Расход ПУТ, кг/т	До 180
Расход природного газа, нм^3/т	До 135
Выход шлака, кг/т	344
КИПО, т/м^3 сутки	3,27/3,74
Удельная производительность на м^2 горна в сутки	95,5

На основе совместной работы были выработаны следующие основные технологические параметры доменной печи:

1. Конструкция доменной печи: свободностоящая доменная печь, кожух выполнен из стали 06Г2МФБ (разработка ЕВРАЗ НТМК) толщиной 40–60 мм.
2. Профиль доменной печи с увеличенной высотой горна, заплечиков и распара, с переменным углом шахты. Величина зумпфа 2,7 м. Количество фурм — 22 шт., количество леток — 2 шт.
3. Воздушное подлещадное охлаждение. Охлаждение горна — от фурменной зоны с помощью кессонов технической водой. Охлаждение фурменной зоны — технической водой. Охлаждение заплечиков, распара и шахты с помощью принудительного испарительного охлаждения. Циркуляционная насосная производительностью 2000 м^3/час расположена на кровле литейного двора. Расход технической воды — 2000 м^3/час.
4. Холодильные плиты из высокопрочного чугуна: фурменная зона — нижняя часть — верх шахты; медные плитовые: фурменная зона — верхняя часть, заплечики, распар, нижняя шахта. Поставка медных плит осуществлялась фирмой Paul Wurth по чертежам, разработанным ГК «МетПром». Холодильные плиты оснащены термопарами для контроля температуры тела холодильника.
5. Футеровка горна из углеродистых графитированных микропористых и супермикропористых блоков. Для снижения тепловых потерь применен керамический стакан из алюмокарборундовых изделий. Предусмотрена система контроля разгара горна. Фурменная зона выполнена из крупноблочных корундовых изделий с содержанием Al_2O_3 86,5%. Заплечики, распар и шахта — тонкостенная футеровка жаростойким бетоном.
6. Опорная система из четырех разнесенных опорных колонн с фурменной площадкой шириной 7 м.
7. На печи установлено следующее основное технологическое оборудование:
   - фурменные приборы сильфонного типа (поставка Paul Wurth) — 22 шт.;
   - фурмы: однокамерные, предусмотрен контроль прогара фурм и фурменных холодильников;
   - двухтрактовый засыпной аппарат с вращающимся лотком (поставка Paul Wurth);
   - для исследовательских целей установлены две стационарные термобалки, три радарных уровнемера, инфракрасная камера;
   - монтажная балка грузоподъемностью 40/10 т;
   - скиповая лебедка ЛС 39 (поставка ЮУМЗ) с частотным приводом управления (поставка Primemetals).

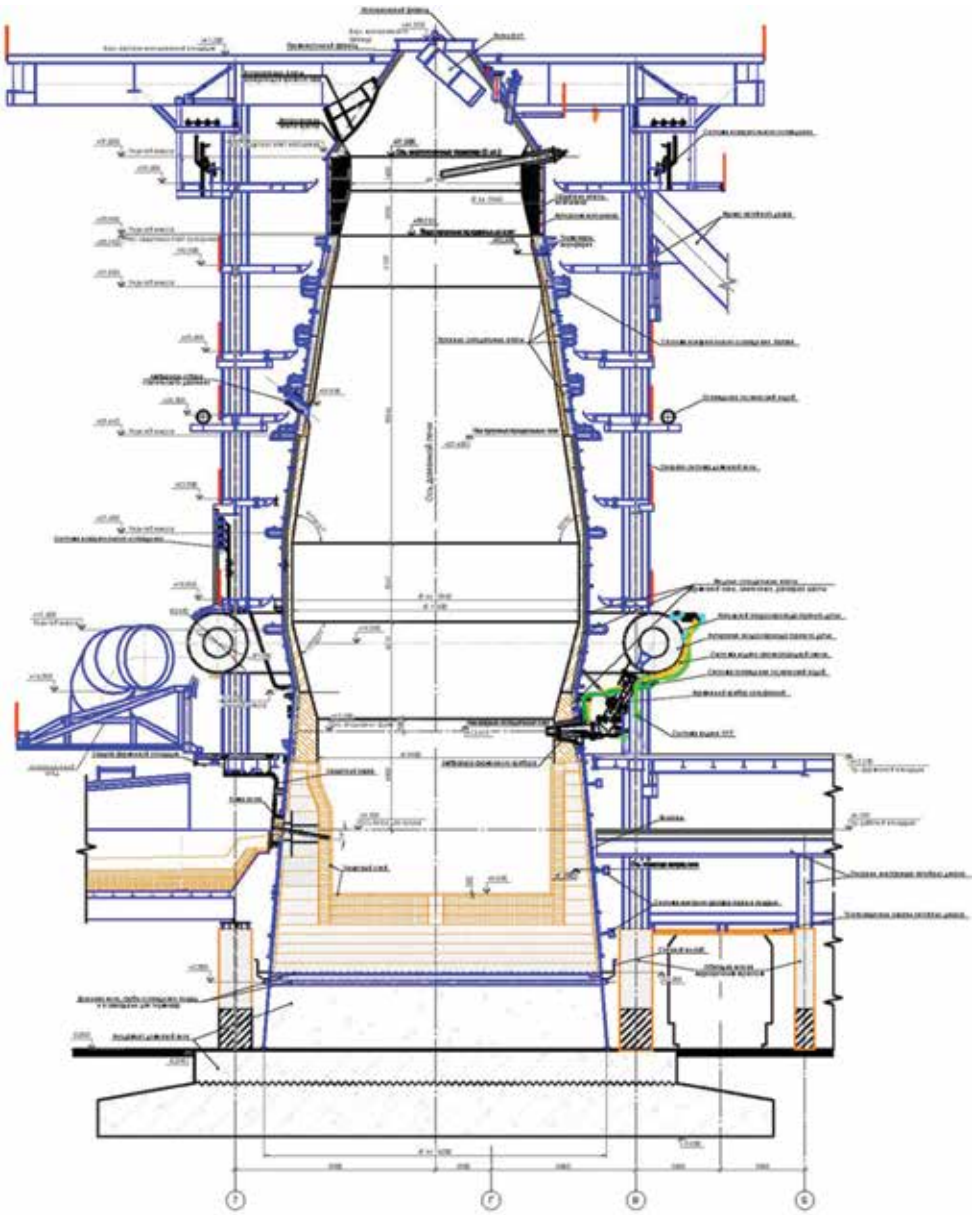


Рис. 1. Доменная печь № 7 АО «ЕВРАЗ НТМК». Разрез

Два полностью закрытых литейных двора плоского типа с размещением отсосов и воздуховодов под перекрытием. На каждом литейном дворе установлен комплект гидравлического оборудования (поставка ТМТ) в составе:

- машины для вскрытия чугунной летки;
- машины для забивки чугунной летки;
- манипулятора для съема укрытия грузоподъемностью 30 т;
- поворотных желобов для разливки шлака;
- качающихся желобов для разливки чугуна.

Главные желоба: длина 17,3 м, неохлаждаемые, с контролем температуры кожуха.

Для предотвращения застывания чугуна и шлака длина транспортных желобов минимизирована. Для их футеровки используются огнеупорные наливные массы.

На доменной печи предусмотрен контроль налива чугуновозов с помощью уровнемеров.

Система аспирации литейных дворов рассчитана на отсос 1400 тыс. нм^3/ч аспирационного воздуха. Предусматривается устройство отсосов загрязненного воздуха от леток для чугуна, от главных желобов в районе скиммера, от мест слива чугуна и шлака в ковши. Впервые в России применен боковой и верхний отсос от главного желоба, что показало свою высокую эффективность в технологических условиях выпуска на ЕВРАЗ НТМК. На всех отсосах устанавливаются клапаны для отключения каналов аспирационных воздуховодов в зависимости от фазы выпуска. Воздуховоды аспирационной системы в пределах литейного двора располагаются под рабочей площадкой на отметке 6,000. За пределами литейного двора воздуховоды объединяются и направляются на аспирационную установку.

Для обслуживания литейного двора установлены мостовые краны грузоподъемностью 32/5 т. Работа кранов, толкателей и гидравлического оборудования может осуществляться как со стационарных пультов, так и с помощью радиоуправления.

На доменной печи предусмотрен сквозной проход под фурменной площадкой с одного двора на другой. Фурменная площадка имеет расширения для возможности установки электрокаров, которые осуществляют замену фурменных приборов.

Здание управления печью имеет 2 этажа и примыкает к литейному двору.

Для тонкой очистки и охлаждения доменного газа разработана двухступенчатая система газоочистки, включающая в качестве основного оборудования осевой циклон (первая ступень — сухая очистка) и скруббер (вторая ступень — мокрая очистка) со встроенными элементами Вентури с регулируемым кольцевым зазором. В результате эффективность очистки газа составляет 99,99%, содержание пыли после газоочистки — 4 мг/м^3. Поставщик оборудования сухого циклона и газоочистки — компания Paul Wurth. В ближайшее время планируется строительство ГУБТ для новой газоочистки доменного газа.

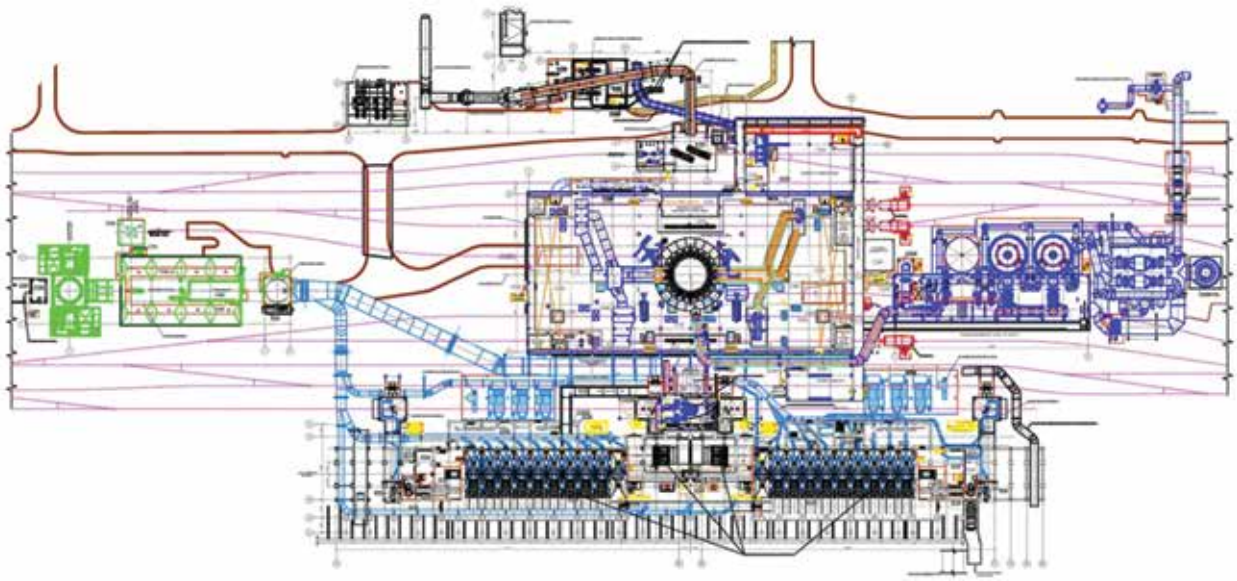


Рис. 2. Доменная печь № 7 АО «ЕВРАЗ НТМК». План

На доменной печи в составе блока воздухонагревателей — три новых малогабаритных бесшахтных воздухонагревателя конструкции Калугина (ВНК) со струйно-вихревой горелкой на верху купола, высота которых составляет 39,0 м. В ВНК применена шестигранная насадка с диаметром отверстий 20 мм и удельной поверхностью нагрева 64 м^2/м^3. Воздухонагреватели рассчитаны на рабочую температуру дутья 1250 °С, давление дутья 0,4 МПа, расход дутья до 4900 м^3/мин. Воздухонагреватели оборудованы теплообменниками для подогрева газа и воздуха горения до температуры 130 °С.

Необычная конструкция разработана для скипового подъемника полезной емкостью 17 м^3: помещение лебедок установлено над наклонным мостом. Такое решение позволяет уменьшить количество

направляющих шкивов и сократить затраты на их обслуживание. При этом номинальная грузоподъемность лебедки 39 т, а максимальная — 62 т. Также установлено два двигателя с частотным управлением мощностью 800 кВт каждый.

Наиболее сложный объект в проектировании и строительстве доменной печи — бункерная эстакада. При проектировании доменной печи №7 ЕВРАЗ НТМК сложности возникли в связи с тем, что существующая бункерная эстакада была рассчитана на работу доменной печи объемом 1500 м³, и возможности расширения бункеров были ограничены старой сеткой колонн. В этих условиях специалистами ГК «МетПром» было разработано решение, предусматривающее строительство двух бункеров кокса (запас 6 часов), 16 бункеров окатышей (запас 8,4 часов), 13 бункеров агломерата (запас 17,5 часов), 10 бункеров добавок. В проекте для агломерата и железофлюса предусмотрена схема питатель/грохот/весовая воронка, для окатышей и добавок — схема питатель/весовая воронка. Уборка мелочи кокса и агломерата выполняется с помощью вертикальных конвейеров в приемные бункера и затем направляется в ж/д вагоны. Резервирование конвейеров не предусмотрено.

Количество пылегазовыделений (аспирационного воздуха) ДП №7 ЕВРАЗ НТМК составляет:

— на литейных дворах — 1 400 000 м³/ч;
— на бункерной эстакаде — 600 000 м³/ч;
— на БЗУ — 100 000 м³/ч.

Суммарный объем аспирационного воздуха, поступающего на очистку, составляет 2 100 000 м³/ч. Специалистами ГК «МетПром» было принято решение установить совмещенную аспирационную установку для литейного двора и бункерной эстакады, в которой установлен блок рукавных фильтров и два дымососа производительностью по 1050 тыс. м³/час с приводами мощностью 2950 кВт каждый. В результате содержание пыли на выходе из аспирационной установки принято 20 мг/м³.

На доменной печи установлена комплексная система автоматизации фирмы Primemetals. Поставка фирмы включает все электрооборудование, КИП, АСУ ТП и экспертную систему.

Доменная печь № 7 вышла на проектные показатели в августе 2018 г. На текущий момент на доменной печи серьёзных технологических проблем не возникало. Небольшие возникающие трудности устраняются фирмами-изготовителями.

Сейчас наша компания работает над проектом доменной печи № 3 ПАО «Северсталь». Это новая доменная печь объемом 3200 м³ на месте снесенной печи № 3 объемом 2000 м³. Основные параметры печи представлены в таблице 2.

Таблица 2. Основные параметры доменной печи №3 ПАО «Северсталь»

Наименование показателя	Проектные значения
Объем доменной печи(до летки), м³	3200
Объем доменной печи(до фурм), м³	2853
Диаметр горна, м	12
Производительность, т/сутки	7280
Температура дутья, °С	1300
Давление под колошником, МПа (изб)	0,25
Содержание кислорода в дутье, %	До 35
Расход кокса, кг/т (с технологией вдувания ПГ и ПУТ)	420
Отсев кокса, кг/т	32
Расход природного газа, нм³/т	До 150
Выход шлака, кг/т	256
КИПО, т/м³ сутки	2,28/2,55
Удельная производительность на м² горна в сутки	64,4

Собственно доменная печь конструкции Danieli Corus имеет следующие основные технологические показатели:

1. Конструкция доменной печи — свободностоящая доменная печь, кожух выполнен из стали 09Г2МФБ толщиной 40–70 мм.
2. Профиль доменной печи:
   - диаметр горна — 12,0 м;
   - диаметр распара — 13,8 м;
   - диаметр колошника — 9,1 м;
   - угол наклона стен шахты — 82°18’00”;
   - угол наклона заплечиков — 78°0’00’’;
   - высота распара — 2,18 м, горна — 7,1 м и глубина зумпфа — 3,1 м;
   - количество фурм — 22 шт., количество леток — 3 шт.

   Холодильные плиты из высокопрочного чугуна применяются в горне и верхней части шахты. В фурменной зоне (низ), заплечиках, распаре, в фурменной зоне (верх) и нижней шахте используется горизонтальные медные холодильники в комбинации с графитовыми и карбид-кремниевыми изделиями. Поставка всех холодильных плит будет проводиться фирмой Danieli Corus. Подлещадное охлаждение водяное. Охлаждение печи осуществляется химочищенной водой. Фурменные приборы имеют охлаждение технической водой.
3. Футеровка горна из углеродистых графитированных микропористых и супермикропористых блоков Nippon Electrode. Верхняя часть лещади выполнена из алюмокарборундовых изделий с содержанием Al_2O_3 75% и SiC 9%. Предусмотрена система контроля разгара горна. Фурменная зона выполнена из графитированных изделий с содержанием Al_2O_3 86,5%.

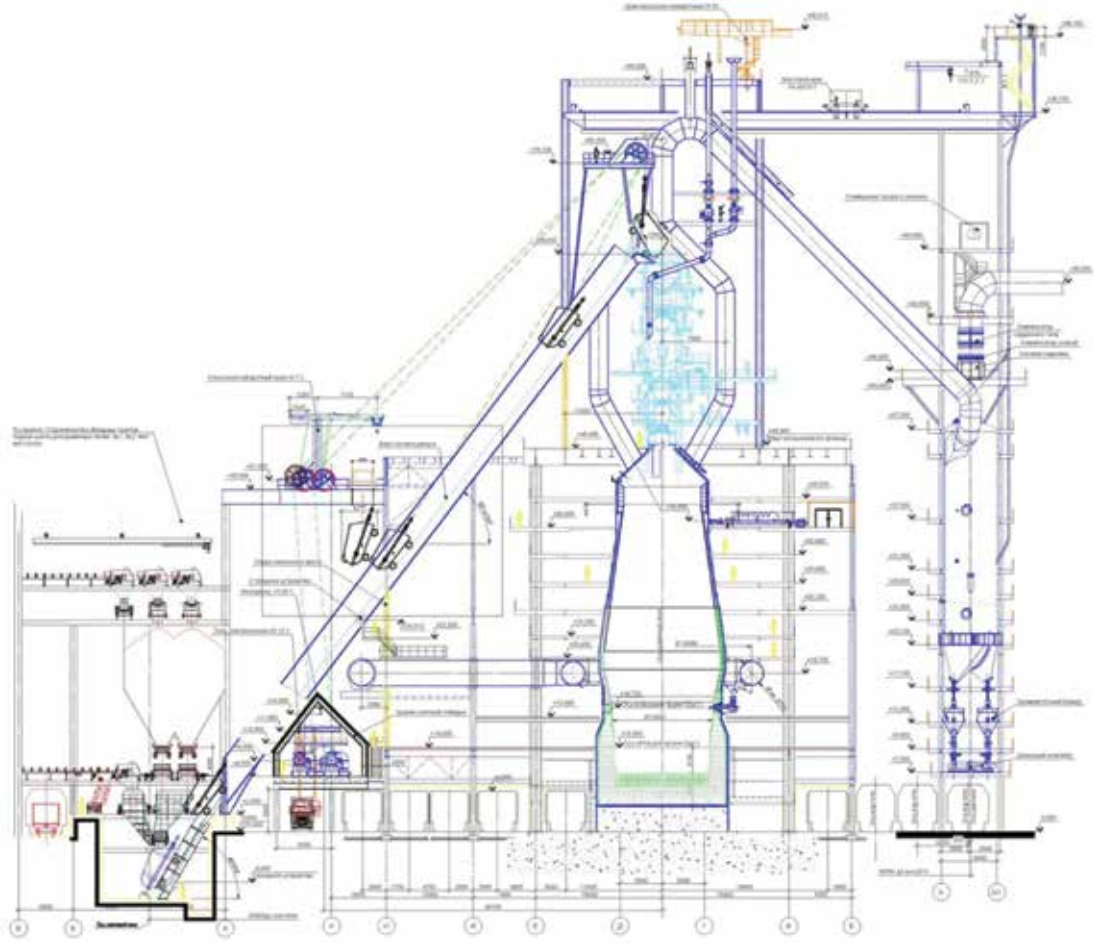


Рис. 3. Доменная печь № 3 ПАО «Северсталь». Разрез по оси цеха

4. Опорная система из четырех разнесенных опорных колонн с фурменной площадкой шириной 7 м.
5. На печи будет установлено следующее основное технологическое оборудование:
   - фурменные приборы обычного типа — 32 шт.;
   - однокамерные фурмы, в которых будет предусмотрен контроль прогара фурм и фурменных холодильников;
   - двухтрактовый засыпной аппарат с вращающимся лотком (поставка Paul Wurth).

Для исследовательских целей планируется установить две машины отбора проб газа, инфракрасную камеру, 3 радарных уровнемера, механический зонд для измерения уровня засыпи, радарный профилемер типа TOP SCAN, систему SOMA для контроля температуры поверхности засыпи и видеокамеру.

В доменной печи будет предусмотрена монтажная балка грузоподъемностью 40/10 т и скиповая лебедка грузоподъемностью 39 т с частотным приводом управления.

Проектируются литейные дворы плоского типа с размещением отсосов и воздуховодов под перекрытием, на которых будет установлен комплект гидравлического оборудования (поставка TMT) в составе:

- машины для вскрытия чугунной летки;
- машины для забивки чугунной летки;
- манипулятора для съема укрытия грузоподъемностью 30 т.

Проектируются главные желоба длиной 18 м с воздушным охлаждением и контролем температуры кожуха. Для футеровки желобов будут использованы огнеупорные наливные массы.

Предусмотрен контроль налива чугуновозов с помощью уровнемеров, а также установка толкателей на шлаковозных путях.

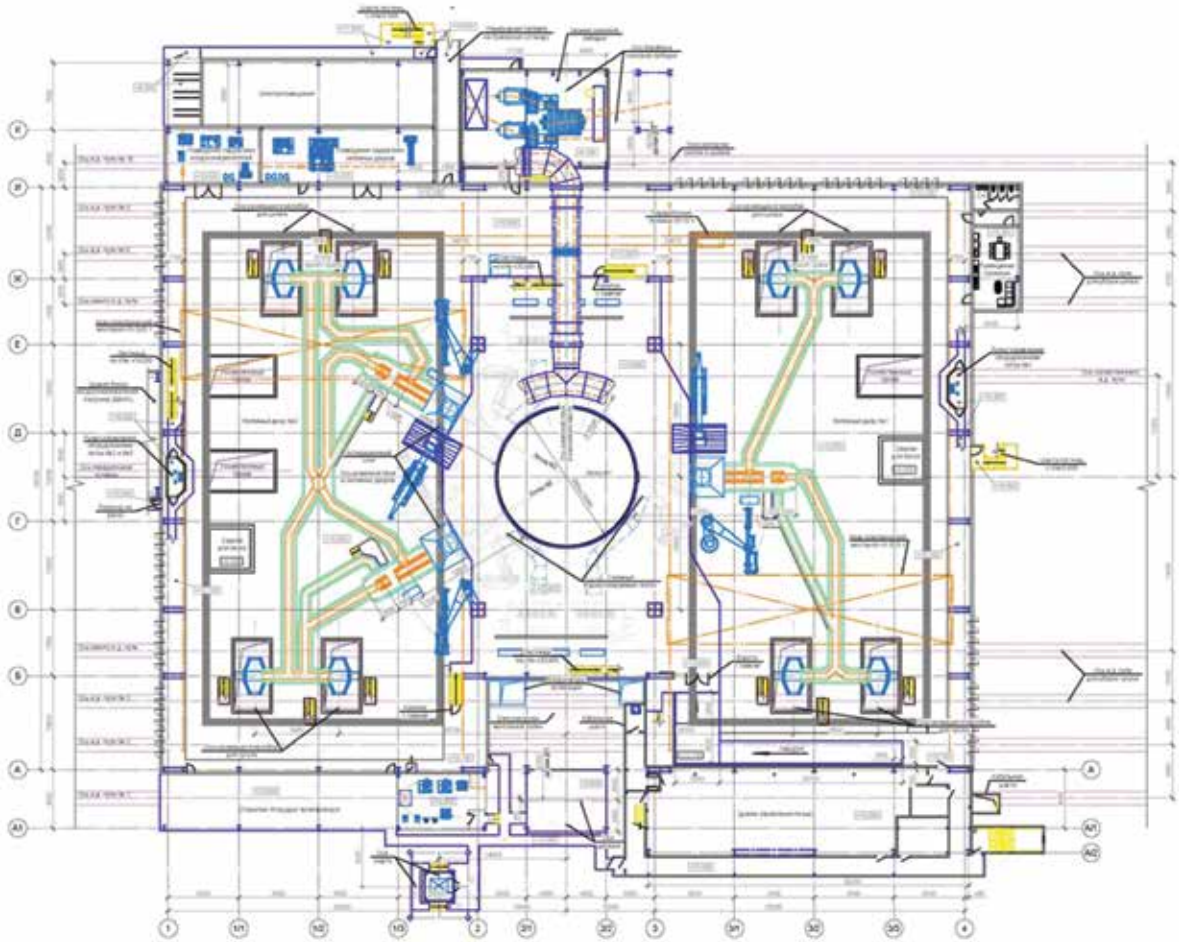


Рис. 4. Доменная печь № 3 ПАО «Северсталь». План литейного двора

Система аспирации литейных дворов рассчитывается на отсос 1200 тыс. нм^3/ч аспирационного воздуха. Предусматривается устройство отсосов загрязненного воздуха от леток для чугуна, от главных желобов в районе скиммера, от мест слива чугуна и шлака в ковши. Будет также применен боковой и верхний отсос от главного желоба. На всех отсосах устанавливаются клапаны для отключения каналов аспирационных воздуховодов в зависимости от фазы выпуска. Воздуховоды аспирационной системы в пределах литейного двора располагаются под рабочей площадкой. За пределами литейного двора воздуховоды объединяются и направляются на аспирационную установку.

Для обслуживания литейного двора будут установлены мостовые краны грузоподъемностью 32/5 т.

Предусматривается сквозной проход под фурменной площадкой с одного двора на другой; фурменная площадка имеет расширения для возможности установки электрокаров, которые осуществляют замену фурменных приборов. В перспективе, после вывода из эксплуатации доменной печи № 2, будет выполнен автовъезд.

Здание управления печью имеет 3 этажа и примыкает к литейному двору.

Для тонкой очистки и охлаждения доменного газа будет построена двухступенчатая газоочистка, включающая в качестве основного оборудования радиальный циклон (первая ступень — сухая очистка) и скруббер (вторая ступень — мокрая очистка) со встроенными элементами Вентури с регулируемым кольцевым зазором и горизонтальный каплеуловитель. Проектная эффективность очистки газа составляет 99,99%; содержание пыли после газоочистки — 4 мг/м^3. Поставщик оборудования сухого циклона и газоочистки — Danieli Corus. В комплексе доменной печи будет выполнено строительство ГУБТ для новой газоочистки доменного газа.

В составе блока воздухонагревателей — четыре новых малогабаритных бесшахтных воздухонагревателя конструкции Калугина (ВНК) со струйно-вихревой горелкой на верху купола. В ВНК высотой 39,0 м применена шестигранная насадка с диаметром отверстий 20 мм и удельной поверхностью нагрева 64 м^2/м^3. Воздухонагреватели рассчитаны на рабочую температуру дутья 1300 °С, давление дутья 0,42 МПа. Воздухонагреватели оборудованы теплообменником для подогрева газа до температуры 130 °С.

Скипы рассчитаны на полезную емкость 18 м^3; грузоподъемность лебедки номинальная — 39 т; планируется установить два двигателя мощностью по 800 кВт каждый с частотным управлением.

Необычная конструкция принята для бункерной эстакады. Существующая бункерная эстакада была рассчитана на работу доменной печи 2000 м^3 и зажата между доменными печами №№ 2 и 4. В связи с этим принято решение разделить бункерную эстакаду на две части. Непосредственно на месте старой эстакады будут сооружены два бункера кокса (запас 8 часов) и два бункера кокса-орешка (запас 13 часов). На расстоянии 60 м от первой будет сооружена вторая бункерная эстакада для железорудной части шихты, на которой будут набираться порции железорудной части и транспортироваться к весовым воронкам ЖРЧ в скиповой яме. Эстакада будет иметь 12 бункеров агломерата и окатышей (запас 14 часов) и 9 бункеров добавок. Предусмотрена возможность загрузки агломерата фракции 3–6,3 мм. Для агломерата, окатышей и кокса предусмотрена схема питатель/грохот/весовая воронка, для добавок — схема питатель/весовая воронка. Уборка мелочи кокса и агломерата будет выполняться с помощью вертикальных конвейеров в приемные бункера. Уборка мелочи агломерата будет выполняться конвейерным транспортом. Уборка мелочи кокса будет осуществляться в вагоны. Подача материалов на бункерные эстакады будет осуществляться с помощью 4 наклонных конвейеров.

Предусматривается общая совмещенная аспирационная установка для литейного двора и бункерной эстакады. Аспирационная установка бункерной эстакады осуществляет также отсос от всех точек перегрузки конвейерных трактов и скиповой ямы и бункеров кокса. Количество пылегазовыделений (аспирационного воздуха) составляет:

— на литейных дворах — 1 200 000 м^3/ч;

— на бункерной эстакаде — 1 300 000 м^3/ч.

Содержание пыли на выходе из аспирационной установки принято 10 мг/м^3. Для достижения этого показателя планируется установить два блока рукавных фильтров, а также три дымососа (два рабочих и один резервный) на каждой аспирационной установке.

Система автоматизации будет российской разработки по проекту ВНИПИСАУ-20.

К. Бодевинг, Ж.Ф. Штумпер, М. Крюсманн, М. Мозер, Е. Абрамс, TMT Tapping Measuring Technology

TMT — НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЛИТЕЙНЫХ ДВОРОВ И ЗОНДОВ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

В современных экономических условиях задача достижения максимальной эффективности работы и продления срока кампании доменной печи является еще более актуальной, чем в прошлом.

Для TMT — это стимул к развитию новых технологий, которые помогут операторам доменных печей в достижении их целей.

- **«TMT-SOMA™»** — акустическая 2D-система измерения температуры газа над уровнем засыпи.
- **«3D TopScan»** — 3D-профилемер для мониторинга процесса загрузки доменной печи в режиме онлайн.
- **«LLM-Измерение уровня жидкого материала»** — оборудование для мониторинга уровня жидкого материала внутри доменной печи.
- **«Высокоточный анализатор колошникового газа»** — система точного анализа газа для мониторинга химического состава колошникового газа доменной печи.
- **«Перфоратор HS600»** — новый перфоратор для бурения леток, оснащенный адаптивными настройками мощности.

Все разработки основываются на следующих принципах:

- самый высокий уровень надежности;
- постоянное снижение производственных расходов для максимального сокращения сроков окупаемости инвестиций для заказчика;
- простота в обслуживании или отсутствие необходимости в техническом обслуживании.

TMT SOMA™: 2D-СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КОЛОШНИКОВОГО ГАЗА

Информация о распределении температуры колошникового газа и местонахождении газового канала в конусе ДП является важной для оператора, так как позволяет настроить программу загрузки для оптимизации процессов в ДП.

Классическая технология

Классическая технология измерения температуры газа на доменных печах обычно включает 2–4 температурных зонда.

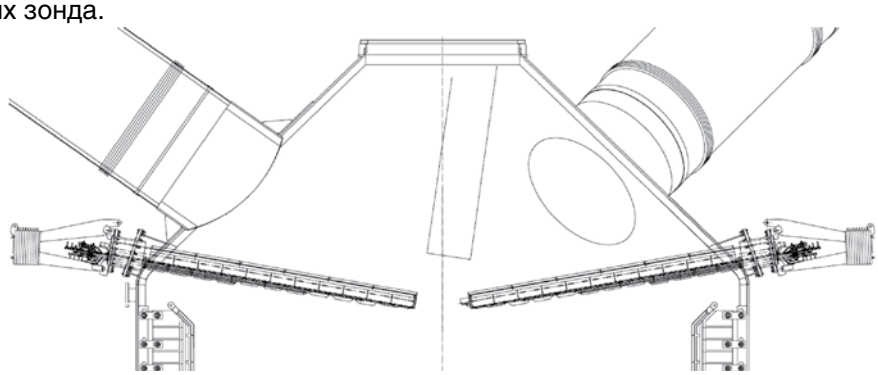


Рис. 1. Расположение классических температурных зондов

Даже при условии установки четырех классических температурных зондов соотношение «охват/плотность измерения» на поверхности шихты низкое и неравномерное. Фактически данная технология не предоставляет полной картины распределения температуры газа и не позволяет отслеживать центральный газовый канал.

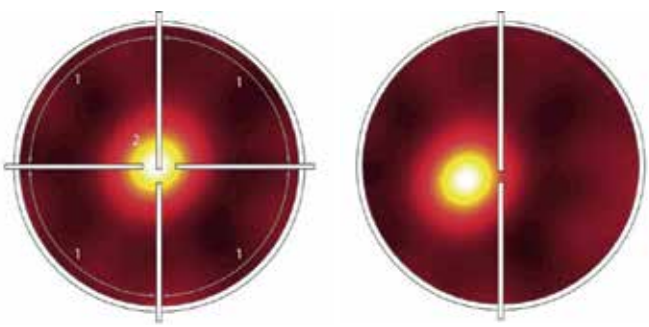


Рис. 2. Измерение температурного поля и расположение температурных зондов

Низкий охват измерением на границе даже при условии использования четырех температурных зондов над уровнем засыпи (1), при расположении газового канала в центре (2) (a). Невозможно точно отслеживать расположение газового канала с использованием двух или четырех температурных зондов над уровнем засыпи (b).

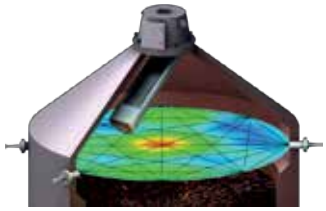
Описание новой разработки TMT SOMA™ — технологии измерения температуры газа

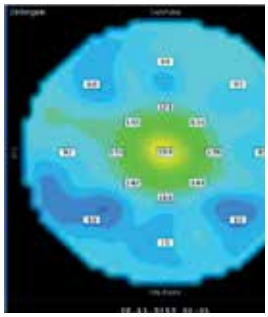
TMT-SOMA™ является инновационной и надежной системой измерения температуры колошникового газа доменной печи.

Принцип работы данной системы основывается на акустическом измерении температуры, дополненном 2D-томографической оценкой данных.

Полученное 2D-распределение температуры предоставляет операторам доменной печи новые возможности анализа процессов, ранее недоступные при использовании обычных многоточечных температурных зондов. Кроме того, данное оборудование прекрасно подходит для использования в комбинации с интеллектуальными системами управления процессами доменной печи и экспертными системами мониторинга.

Принцип измерения: Несколько приемопередатчиков, каждый из которых выполняет функцию передатчика и приемника, установлено по окружности доменной печи. Каждый приемопередатчик издает звуковой сигнал, записываемый другими приемопередатчиками. Производится измерение времени прохождения звука. Скорость прохождения звука прямо пропорциональна температуре газа.





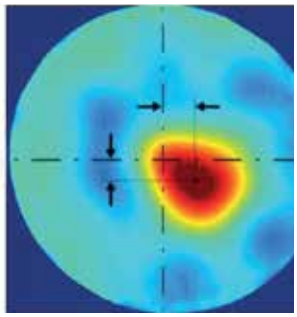


Рис. 3. Примеры настроенных под заказчика HMI-экранов для системы TMT-SOMA
Изотермический вид *Определение газового канала*

После того как все приемопередатчики выполнили передачу звукового сигнала, высокопроизводительный процессор производит расчет актуальной температуры газа между приемопередатчиками. Алгоритм послойного анализа, специально разработанный для условий доменной печи, вычисляет все измерения для отображения полного 2D-изотермического изображения всех температур колошникового газа. Данное изображение обновляется каждые 4–6 сек.

В настоящее время данная система работает на многих доменных печах по всему миру.

Преимущества новой технологии и возможности сокращения расходов

Система TMT-SOMA™ имеет многочисленные преимущества по сравнению с обычными температурными зондами над уровнем засыпи:

Плотность измерения по всему сечению доменной печи значительно выше, и данные более однородны по сравнению с обычными температурными зондами над уровнем засыпи, что делает измеряемые температуры не только более репрезентативными и надежными, но также помогает операторам ДП максимизировать производство и эффективность процессов.

Для этой цели интегрированный **томографический алгоритм** предоставляет набор новых методов оценки температуры газа, необходимой для управления работой доменной печи. Данные методы ранее не были доступны при использовании обычных зондов измерения температуры газа.

В системе **отсутствует инертность,** изменения температуры газа фиксируются мгновенно. Классические температурные зонды, наоборот, не могут зафиксировать быстрое повышение/снижение температуры, являющееся ранним свидетельством о текущих или наступающих отклонениях.

Компоненты системы TMT SOMA™ очень надежны, отсутствует необходимость регулярной замены компонентов (как в случае с классическими температурными зондами). Соответственно, требования по техническому обслуживанию TMT SOMA™ минимальны, что способствует значительному снижению расходов на обслуживание.

В целях максимизации эффективности процесса операторы ДП пытаются наладить точный процесс засыпки шихты. Приемопередатчики системы TMT SOMA установлены на стене доменной печи, соответственно, ее компоненты не взаимодействуют с шихтой. Таким образом, в отличие от обычных температурных зондов, не происходит нарушения схемы загрузки.

Рис. 4. Обычные температурные зонды
Находятся внутри печи и мешают загрузке шихты

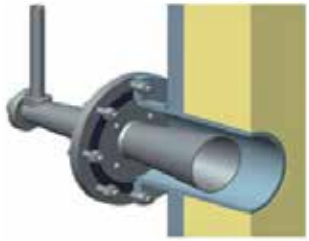


Рис. 5. TMT-SOMA
Приемопередатчик установлен в стене доменной печи

Система TMT SOMA™ способна отслеживать расположение газового канала без каких-либо ограничений или возможности ошибочной интерпретации данных. Кроме того, система обеспечивает возможность мониторинга периферийных температур с хорошим разрешением. Операторы ДП могут оценить взаимодействие между течением газа через центральный газовый канал ДП и у стены, что позволяет оптимизировать производительность и длительность службы ДП.

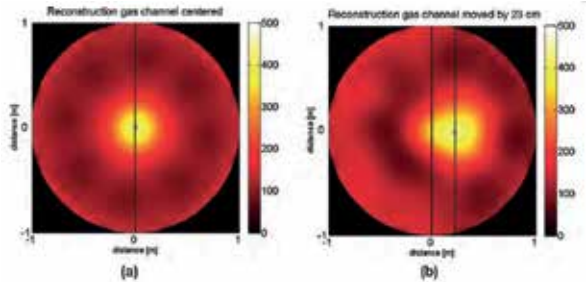
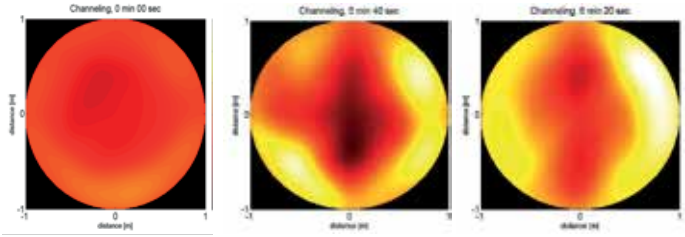


Рис. 6. Отслеживание расположения канала газа
(a) газовый канал расположен точно в центре; (b) газовый канал смещается из центра

Возможно также определение вторичных газовых каналов или газовых каналов у стены и даже определение места их появления.

На следующих иллюстрациях показано, где были определены точки возникновения газовых каналов. Фиксировалось быстрое повышение температур в пограничных районах и по окружности доменной печи (Рисунок 7 b и c).



(a) *(b)* *(c)*

Рис. 7. Показания системы TMT SOMA в реальном режиме времени

Данная последовательность 2D-температурных профилей, записанная при помощи системы TMT SOMA, показывает быстрое появление канала у стены доменной печи во время работы печи.

ВЫВОДЫ

Акустическое измерение температуры является самым современным методом в плане производительности, точности, надежности и предоставляет обратную связь о процессах, которая ранее была невозможна при использовании классических температурных зондов. Системы с видеокамерами, часто предлагаемые для измерения температур, могут предоставить только качественную оценку температуры поверхности, которую они фиксируют. Температура газа, которая является важным показателем эффективности процесса, в таком случае не может быть измерена. Также необходимо принимать во внимание, что качество предоставленной системой видеокамеры данных ухудшается по мере снижения температуры, при температуре ниже 300 °C большинство из них становится практически слепыми.

3D TOPSCAN: НАДЕЖНАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ШИХТЫ

Профилемеры используются для измерения профиля поверхности. Наличие информации о распределении шихты позволяет операторам ДП адаптировать матрицу загрузки для снижения расхода кокса и соответственного снижения операционных расходов.

Тенденция сбора большего количества данных касается не только измерения распределения температуры газа при помощи системы TMT-SOMA™. С появлением профилемера 3D TopScan стало возможным впервые измерить поверхность полностью с высоким разрешением и в режиме реального времени.

Классическая технология

Классический профилемер является, в основном, системой вертикального радарного измерения в одной точке, который линейно двигается по радиусу ДП при помощи горизонтально расположенного копья.

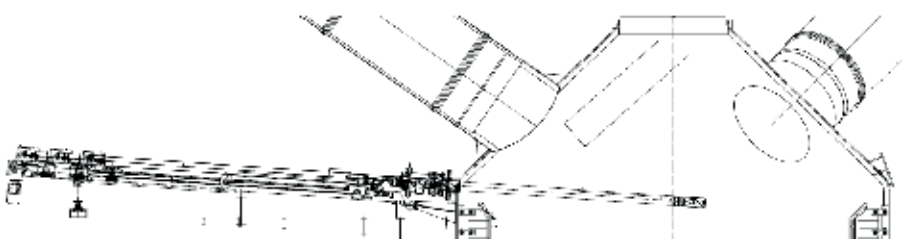


Рис. 8. Классический профилемер

При использовании классических технологий возможно зарегистрировать один предопределенный радиус поверхности шихты. Кроме того, как правило, за одну загрузку измеряется только один профиль, и процесс загрузки останавливается во время измерения. Другие существующие методы измерения производят измерение только отдельных точек и интерполируют их для моделирования профиля поверхности.

Так как известно, что поверхность загружаемой шихты не может быть симметричной, а именно, что профиль по радиусу не одинаков в каждой позиции, целью новой разработки было определить полную конфигурацию поверхности шихты для включения информации об асимметрии.

Описание последней технологии 3D TopScan

Профилемер 3D TopScan устанавливается неподвижно на конусе доменной печи, где он производит измерения в постоянном режиме. Так как никакие механические части не находятся внутри зоны колошника, отсутствуют какие-либо помехи для вращающегося лотка и для загружаемой шихты.

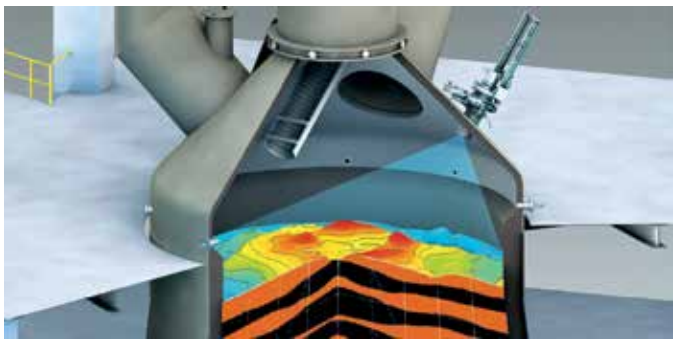


Рис. 9. Установка профилемера 3D TopScan внутри конуса ДП

В целях обеспечения сбора большего количества данных о процессе в короткий отрезок времени и на постоянной основе профилемер 3D TopScan™ использует последние технологии в области радаров и антенн и сканирует **несколько тысяч точек на поверхности** в течение нескольких секунд.

Другие профилемеры могут сканировать только 100–200 измерительных точек в течение более длительного периода.

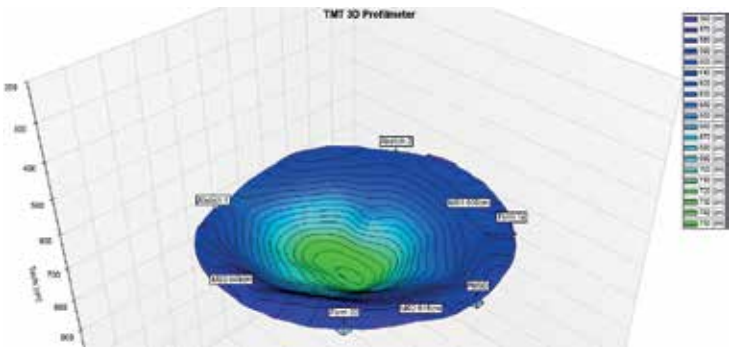


Рис. 10. Поверхность шихты, записанная в течение 20 секунд в работающей ДП

Рис. 11. Профилемер TMT 3D TopScan с возможностью вывода из печи

Каждые 20 секунд составляется изображение поверхности шихты ДП с хорошей детализацией, включающее в общем итоге ~10.000 точек отражения. Короткий период времени имеет ключевое значение, так как в работающей печи шихта постоянно движется вниз. Более длительный процесс сбора данных может значительно ухудшить точность измерения. Вся поверхность шихты измеряется с очень высоким разрешением, при этом даже не требуется допущение о радиальной симметрии или интерполяция.

Одним из основных аргументов в пользу профилемера всегда была легкость в обслуживании. Новый профилемер 3D TopScan может обслуживаться вне зависимости от процессов ДП. Радарная система полностью интегрирована и защищена внутри копья. Как показано на изображении выше, система может быть выведена из работающей печи и изолирована от процесса отсечным клапаном. Сервисное облуживание может в таком случае осуществляться, в то время как ДП остается в работе.

Во время работы и во время вывода копья уплотнение сальниковой коробки обеспечивает газоплотность по отношению к атмосфере. В то время как копье выведено и изолирующий клапан закрыт, система может быть полностью отведена для обслуживания. Соответственно, не происходит потери производства и всегда имеется возможность срочного обслуживания оборудования.

Преимущества новой технологии и возможности снижения расходов

Основным преимуществом для операторов ДП является возможность сканирования всей поверхности шихты и высокая степень обновления данных. Отсутствует необходимость делать допущения симметрии, так как реальные асимметрии на поверхности шихты обнаруживаются во всех деталях. Значительно увеличивается обратная связь для загрузки, и анализ процессов может производиться на новом высоком уровне.

Поверхность отдельных слоев в загрузочной матрице преобразовываются в 3D-модель слоев. Данная модель показывает форму и толщину различных слоев в колонне шихты. Данная информация предоставляет оператору возможность адаптировать загрузочную матрицу для снижения расхода кокса.

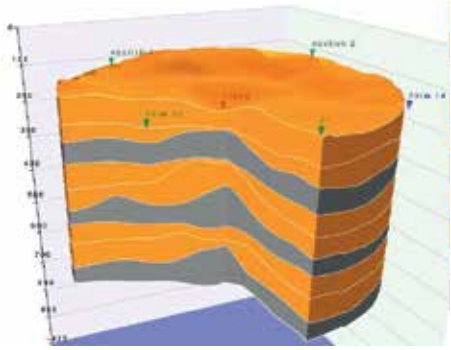


Рис. 12. Пример модели слоев, показывающей случайно выбранный разрез секции распределения шихты (слои кокса показаны черным цветом, слои руды — оранжевым цветом)

Полученные измеренные данные также позволяют рассчитать локальную скорость оседания шихты. Определение однородной скорости помогает определить отклонения в процессах работы ДП.

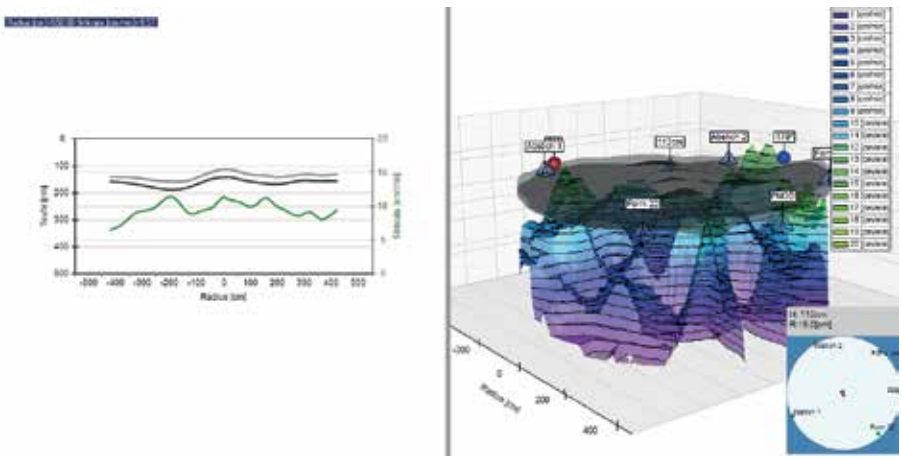


Рис. 13. Пример на графике (2D и 3D), показывающий зоны с высокой и низкой скоростью оседания шихты

В настоящее время технологи работают над инструментами, позволяющими выявить как можно раньше различные отклонения, включая зависание, обрыв шихты и т.д., и дать возможность операторам отреагировать как можно скорее. Это может предотвратить сбой или потери в производстве.

Выводы

Для более точного и реалистичного мониторинга процесса засыпки используется большее количество данных. С использованием профилемера 3D TopScan измеряется не только вся комплексная топография шихты, но также в режиме реального времени измеряется скорость оседания шихты.

Становится очевидным, что опыт использования данного нового инструмента измерения приведет к новым открытиям в области процессов загрузки ДП, которые будут способствовать дальнейшему сокращению производственных издержек.

LLM: ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОГО МАТЕРИАЛА

Наличие информации об уровне жидкого материала внутри доменной печи помогает оператору оптимизировать последовательность выпуска жидких продуктов плавки и, соответственно, оптимизировать процессы ДП.

Однако измерение уровня жидкого материала в горне доменной печи (ДП) является сложной задачей, так как горн ДП представляет собой закрытый стальной кожух под давлением, футерованный защитной огнеупорной футеровкой и содержащий смесь жидкого чугуна, шлака и кокса тотермана.

Доступные процессы измерения жидких материалов, такие как измерение выхода чугуна (взвешивание чугуновозов) или шлака (барабаны системы грануляции шлака INBA) не позволяют операторам определять уровень жидкого материала внутри горна ДП.

Описание новой технологии измерения уровня жидкого материала

Система измерения уровня жидкого материала, разработанная компанией TMT, является новым методом, основанным на использовании тензодатчиков, установленных на кожухе доменной печи и измеряющих растяжение кожуха. Данный метод разрабатывался в течение нескольких лет на доменной печи в Германии.

При увеличении механического усилия на кожух происходит его растяжение. Данное растяжение воздействует также на тензодатчики, которые, соответственно, изменяют свое сопротивление. На иллюстрации внизу показана установка датчиков на горн ДП и система сбора данных.

Рис. 14. Установка системы на ДП с каналом охлаждения на уровне литейного двора

Датчики измерят напряжение на кожухе горна ДП, которое зависит от сочетания следующих факторов, включая:

— термическое растяжение стального кожуха и датчика;
— пневматическое напряжение, вызванное давлением доменного газа;
— гидростатическое напряжение от жидкого материала (шлак и чугун).

Принимая во внимание данные факторы, сигнал от датчика используется для расчета уровня жидкого материала.

Для подтверждения достоверности сигнала тензодатчика на изображении внизу показано наложение результатов измерений тензодатчиков и модели накопления в горне HeLiMo компании «Пауль Вюрт». В целом оба сигнала показывают одинаковую конфигурацию, при этом в абсолютных значениях местами наблюдаются небольшие отклонения.

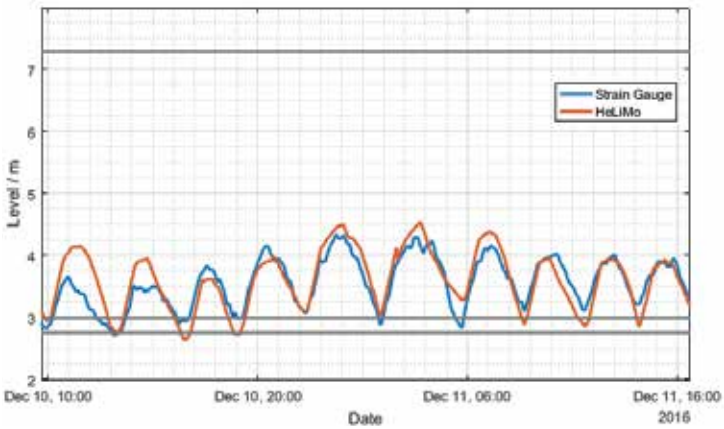


Рис. 15. Сравнение между моделью баланса масс и измерениями уровня при помощи сигналов тензодатчиков Серыми горизонтальными линиями показан внутренний и внешний уровень летки, а также уровень фурм

На графике на рис. 15 внизу показана динамика уровня шлака, измеренная при помощи представленной системы тензодатчиков. Оранжевая кривая показывает изменение уровня жидкого материала.

Красная полоса показывает период нахождения летки в открытом состоянии, тогда как красная полоса показывает период после начала выхода шлака. Наблюдается, что уровень жидкого материала увеличивается на около 0,6 м в период между выпусками и на 0,8 м после выпуска. Дальнейшее увеличение уровня жидкого материала после открытия летки вызвано тем, что скорость выплавки превышает скорость истечения материала. Во время выпуска диаметр летки увеличивается, и скорость истечения материала растет и начинает превышать скорость выплавки.

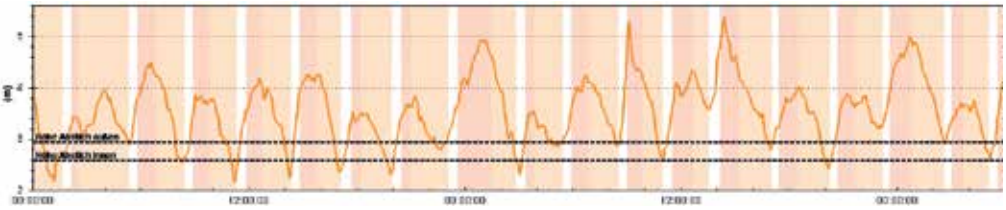


Рис. 16. Уровень жидкого материала показан оранжевой линией. Красная, желтая и белая полосы показывают периоды выпуска шлака, выпуска чугуна или периоды между выпусками, соответственно. Измерения при помощи системы TMT с тензодатчиками в режиме выпуска с одной леткой

Выводы

Опыт использования данной системы подтвердил, что измерение общего уровня жидкого материала в горне ДП может быть выполнено с использованием тензодатчиков. Используемая совместно с правильной компенсацией и специальными методами обработки сигнала, данная система подходит для ежедневного измерения состояния уровня жидкого материала и оптимизации процесса выпуска. Представленная система дает лучшее представление о состоянии жидких материалов внутри горна ДП за счет визуализации.

TMT TOP GAS — ВЫСОКОТОЧНЫЙ АНАЛИЗАТОР КОЛОШНИКОВОГО ГАЗА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

Анализ колошникового газа, используемый для расчета баланса массы-энергии, является одним из самых важных входных параметров для обеспечения работы доменной печи с наибольшей эффективностью. Измеряемые данные требуются для различных математических моделей, используемых для оптимизации использования сырья (в особенности расхода кокса).

Классическая технология:

Стандартное предлагаемое на рынке оборудование для анализа, подходящее для промышленного применения, не обеспечивает требуемой точности. С другой стороны, оборудование для анализа с необходимым уровнем точности может быть использовано только в лабораторных условиях и имеет значительно меньшую надежность при промышленной эксплуатации (в особенности в условиях доменного производства при большой запыленности и высоких температурах).

Описание новой системы анализа колошникового газа TMT Top Gas

Высокоточный анализатор колошникового газа TMT Top Gas представляет собой сочетание стандартного, хорошо зарекомендовавшего себя и предлагаемого на рынке оборудования для анализа с новыми органами управления и калибровки для достижения требуемой точности при разумных усилиях и расходах.

Доменный газ забирается непрерывно из точки отбора после стадии очистки. Система анализа полностью установлена внутри контейнера рядом с точкой отбора проб. Шкаф фильтра предочистки обеспечивает, что чрезмерно высокое количество пыли устраняется из колошникового газа до того, как газ поступает к дополнительному узлу анализатора. Система осуществляет верификацию полученной точности в режиме онлайн при помощи различных методов валидации. В случае отклонения запускается сложная процедура калибровки для определения необходимых параметров обработки данных, что включает перекрестное воздействие нелинейных эффектов насыщения и т.д.

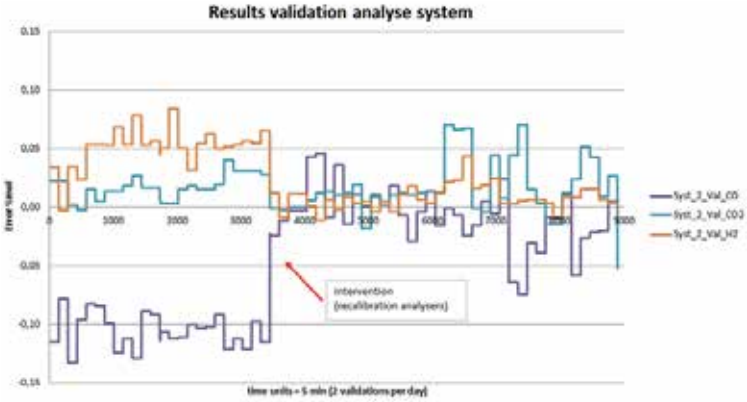


Рис. 17. Тенденция измерения валидации анализатора колошникового газа TMT

Измерения CO и CO_2 выше 0,1% и измерение H_2 выше 0,15%, на данном примере последовательность калибровки выполняется только для иллюстрации эффективности и стабильности работы системы.

Система TMT Top Gas достигает следующей точности измерений:

- ± 0,10% для CO
- ± 0,10% для CO_2
- ± 0,15% для H_2

Во избежание недопустимых отклонений система поставляется совместно с устройствами калибровки, позволяющими производить валидацию системы анализа.

Выводы

В то время как даже небольшие отклонения в параметрах управления могут привести к значительным изменениям в фактических результатах производства, анализатор колошникового газа сочетает высокую точность с высокой надежностью, позволяя операторам ДП управлять процессами на более высоком уровне и предоставляют возможность увеличить эффективность работы доменной печи в будущем.

Точность между 2–4% при использовании классических систем анализа газа является недостаточной для оптимизации ETA CO (эффективность использования восстановительной способности газового потока). Учитывая, что увеличение ETA CO на 1% можно перевести в экономию кокса около 6 кг/т чугуна, окупаемость высокоточного анализа газа достигается в течение нескольких месяцев.

ПОЛНОСТЬЮ ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПЕРФОРАТОР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ HS 600

Управление большой доменной печью с высокой производительностью требует эффективного и надежного оборудования литейного двора. Стремление к высокой операционной эффективности и снижению расходов также способствовало развитию новых технологий в области перфораторов, которые привели к появлению нового поколения перфораторов, способных переключаться между различными диапазонами производительности для максимальной защиты летки и горна доменной печи.

Классическая технология

В связи с разработкой новых высокоэффективных леточных масс с повышенной абразивной и коррозийной стойкостью сама летка более не является ограничивающим фактором для времени открытия. Данные высокоэффективные леточные массы значительно увеличили требования к оборудованию для вскрытия и закрытия летки.

Пневматические машины для открытия летки быстро достигли своей предельной производительности, что привело к неудовлетворительным показателям времени открытия. Часто процесс открытия должен был сопровождаться работой с кислородным копьем, что приводило к повреждениям леточного канала и росту расходов на ремонт. Решением данной проблемы стало использование полностью гидравлических перфораторов для открытия летки, которые могут справиться с сегодняшними требованиями, связанными с использованием современных леточных масс.

Рис. 18. Диапазон производительности классических перфораторов TMT

Описание самой новой технологии бурения

Требования к бурению, вызванные состоянием летки, изменяются на протяжении длины летки.

Само собой разумеется, конечной целью является вскрытие летки за счет только одного вращения. Однако в реальных условиях летки имеют включения, и леточные массы достигают такого уровня прочности, что применением одного только вращения более невозможно.

В связи с этим для надежного открытия летки оборудование для открытия и закрытия летки должно также предоставлять возможность работы со сложными условиями летки. В идеальных условиях это происходит автоматически для обеспечения наилучшей защиты летки.

До сих пор операторы ДП должны были выбирать между двумя подходами к использованию перфораторов:

- низкая частота / высокая ударная сила — для максимального продвижения бура;
- высокая частота / низкая ударная сила — для лучшей защиты летки и более длительного срока службы летки.

Новый перфоратор HS 600 обладает способностью переключения между различными уровням мощности, режимом высокой частотой удара и режимом высокой силы ударов для обеспечения незамедлительной адаптации параметров бурения к различным условиям летки, как показано на иллюстрации ниже.

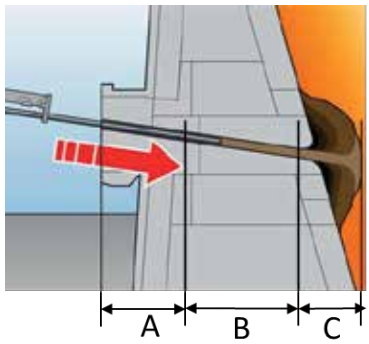
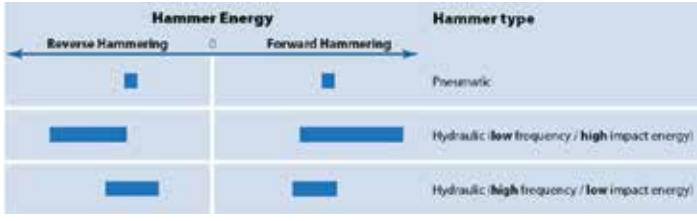


Рис. 19. Зоны летки с различными требованиями к бурению
A: бурение вращением без ударной функции для максимальной защиты летки
B: работа перфоратора на низкой частоте с высокой ударной силой для зон с твердыми включениями
C: работа перфоратора с высокой частотой и низкой ударной силой для минимизации обрыва гриба и достижения максимальной длины летки

Таким образом, перфораторы последнего поколения предлагают комбинированные диапазоны производительности лучших доступных перфораторов для обоих подходов к бурению, которые исключают все ограничения по использованию современных леточных масс. Так как используются основные компоненты предыдущей модели перфоратора HS 5xx, большинство запасных частей взаимозаменяемо.



Классическая технология

Новый HS 600

Переключение между различными режимами может быть осуществлено как в полностью автоматическом, так и в ручном режиме. Преимущество данной технологии обычно максимально при использовании в автоматическом режиме, так как он исключает воздействие человеческого фактора на результаты бурения.

В металлургической отрасли часто распространяется неверное мнение, что пневматический перфоратор наносит меньший вред летке по сравнению с гидравлическим. Но на практике гидравлические перфораторы могут быть настроены на более низкий уровень мощности по сравнению с пневматическими перфораторами (см. график рядом), что обеспечивает значительно более высокую защиту летки.

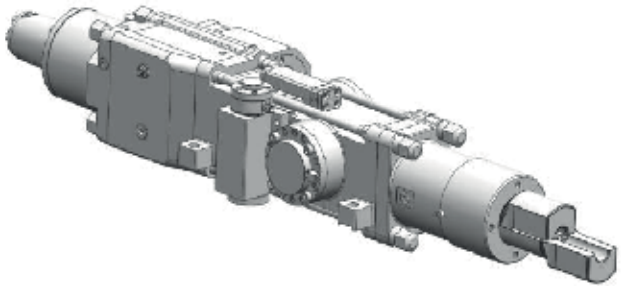


Рис. 20. Перфоратор серии HS 600

Преимущества новой технологии и возможности сокращения расходов

Переключение между двумя настройками производительности предоставляет возможность обеспечить максимальную защиту критически важной зоны летки в целях:

- максимизации срока службы летки;
- снижения количества ремонтов летки;
- увеличения готовности доменной печи к эксплуатации.

Так как данный оптимизированный процесс вскрытия летки защищает летку, а также горн доменной печи, он в итоге способствует более длительной кампании доменной печи.

Помимо преимуществ за счет различных частот работы перфоратора, перфоратор HS 600 обладает также следующими характеристиками, общими для перфораторов серии HS 5xx:

- надежное открытие любой летки без задержек;
- гладкий леточный канал, способствующий меньшему износу летки;
- минимальное использование кислородных копий, что обеспечивает большую безопасность для оператора и предотвращает повреждения структуры летки;
- высокая сила обратного удара для безопасного извлечения застрявшего бура;
- снижение расходов на обслуживание оборудования и увеличенный срок службы перфоратора.

ВЫВОДЫ

Для условий литейного двора, где каждый день большое количество чугуна и шлака должно быть выпущено из печи, особенно актуальны постоянные усовершенствования для снижения издержек. Самые новые технологии бурения способствуют данным усовершенствованиям за счет сочетания высокой производительности бурения и низких расходов на обслуживание с возможностью защиты летки и горна ДП.

Возможности применения новой технологии сложно оценить. Однако очевидно, что избежание дорогостоящих ремонтов летки, увеличение сроков кампании даже только на несколько недель или месяцев может способствовать значительной экономии.

Список литературы

[1] К. Бодевинг, Ж.Ф. Штумпер, М. Крюссманн, П. Паке, М. Тонтелинг. «TMT— новые разработки для оборудования литейного двора и зондов», презентация на конференции MIST, 2016, Ранчи, Индия.
[2] Р. Манчини, Ж.Ф. Штумпер, Р. Лин, К. Бодевинг. «Измерение уровня жидкого материала в доменной печи и оптимизация стратегии открытия летки», конференция AISTech, 2016, США.

Г.И. Алымов, Д.В. Полишкевич, М.Н. Роенко,
ЧАО «ДГМ ГРУПП»

DHM GROUP: 25 ЛЕТ НА РЫНКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИИ

В наш век стремительного технологического прогресса и активного распространения стандартов устойчивого производства одной из ключевых задач сталелитейной промышленности, помимо сокращения затрат в традиционной производственной цепи и внедрения новейших цифровых решений, является снижение негативного влияния производства на окружающую среду. Все больше металлургических компаний по всему миру прибегают к модернизации своих заводов с целью повышения эффективности и экологичности производства. Сегодня поиск устойчивого рынка как никогда важен для производителей стали.

Компания «ДГМ ГРУПП» (ранее известная как ДНЕПРОГИДРОМАШ) — это мощный научно-конструкторский центр с машиностроительным заводом и командой высококвалифицированных специалистов, возможности которого позволяют выполнять комплексные проекты от разработки индивидуального высокотехнологичного оборудования для металлургических предприятий с «чистого листа» до поставки его «под ключ» и последующим сервисным обслуживанием, обеспечением запасными частями и технической поддержкой.

За 25 лет существования на рынке ключевой стратегией ДГМ ГРУПП всегда являлось создание современных проектных решений с применением новейших материалов и технологий с целью снизить материалоемкость производства, повысить эффективность работы агрегатов, а также обеспечить безопасные условия труда. Качество оборудования ДГМ ГРУПП находится на одном уровне с продукцией европейских машиностроительных концернов и ценится во всем мире. За четверть века в число клиентов компании вошло более 90% металлургических заводов на территории СНГ, а с 2000 года компания активно расширяет

географию поставок на международном рынке. На сегодняшний день оборудование успешно эксплуатируется в 15 странах мира.

Из последних разработок конструкторским центром компании был завершен проект создания **бесконусного загрузочного устройства** лоткового типа для доменных печей. В конструкции нового загрузочного устройства применены технические решения, учитывающие современные требования к процессу загрузки и распределению материалов по сечению колошника доменной печи, а также позволяющие выполнить размещение устройства в существующих габаритах копра. На данный момент проект находится на этапе производства прототипа в натуральную величину с целью проведения исследований по распределению материалов и надежности работы механизмов.

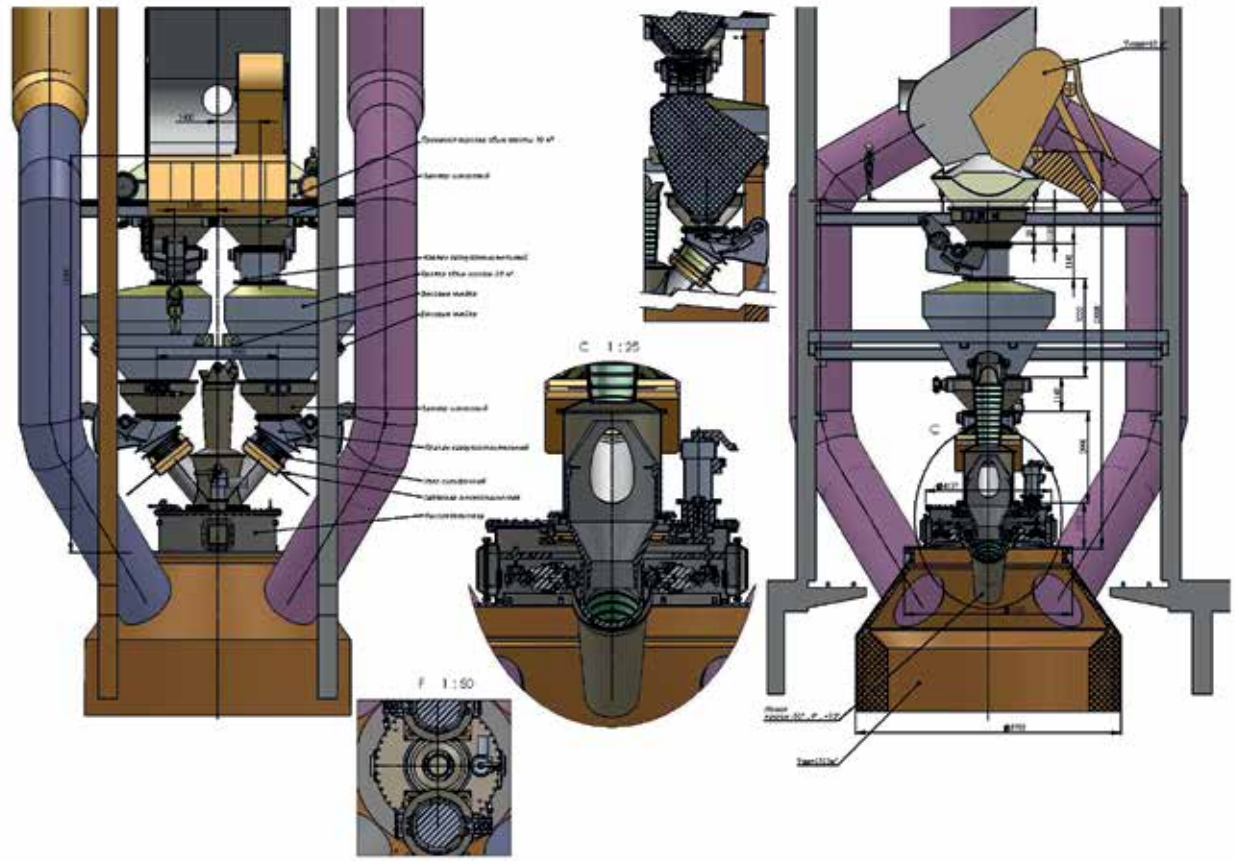


Рис. 1. Бесконусное загрузочное устройство ДГМ ГРУПП

Новым витком развития компании является комплексный подход к проектированию литейных дворов, систем аспирации и комплексной поставке всего технологического оборудования. Первым подобным проектом стало сотрудничество ДГМ ГРУПП с Магнитогорским металлургическим комбинатом для модернизации доменной печи № 9. Наша команда выполнила базовый инжиниринг литейного двора и системы аспирации печи, а также выполнила привычную для себя поставку гидравлического оборудования литейного двора.

Следующий этап сотрудничества с ММК — разработка базового и детального проекта литейного двора и системы аспирации ДП-10, поставка гидравлических машин вскрытия и закрытия лёток, качающихся желобов и различных манипуляторов нового поколения (Рис. 2).

Эффективность и качество разработанных решений привели к тому, что в 2017 году ДГМ ГРУПП был доверен комплексный проект по модернизации литейного двора и системы аспирации доменной печи № 1 (Рис. 3), а также произведен и поставлен весь комплекс необходимого оборудования, вклю-

чая саму систему аспирации. Данные изменения приведут к снижению выбросов пыли и вредных веществ в атмосферу до 600 тонн в год, что значительно улучшит условия работы металлургов и снизит негативное влияние производства на экологию. Кроме того, система повышает и эффективность производства: за счет конструкции главного желоба шлак и чугун лучше разделяются — то есть в шлак попадает меньше ценного чугуна, а в чугун — меньше шлака, а значит сырье экономится, а качество продукции улучшается.

Рис. 2. Современные гидравлические машины литейных дворов доменных печей производства ДГМ ГРУПП

Рис. 3. Слева — ДП-2 без системы аспирации, справа — ДП-1 после реконструкции

Опыт показывает, что комплексный подход к реконструкции литейных дворов доменных печей является самым эффективным в плане решения технологических задач по выпуску продуктов плавки. Снижаются срывы графика выпусков, появляется возможность регулирования скорости выпуска продуктов плавки, уменьшаются потери температуры чугуна, уменьшаются потери чугуна в шлак и снижается попадание шлака в чугун, качественно работает аспирация, а как результат — улучшаются условия труда и его безопасность.

Мы гордимся тем, что за 25 лет существования ДГМ ГРУПП все больше крупнейших производителей на территории СНГ, подобно Магнитогорскому комбинату, возвращаются к нам с новыми задачами и крупными проектами. Мы искренне верим, что подобное доверительное сотрудничество помогает развивать индустрию и создавать все больше высокотехнологичных проектов, тем самым повышая эффективность компаний и снижая негативное влияние на нашу экологию. Поэтому уже более 4 лет в городе Магнитогорске работает представительство ДГМ ГРУПП в России, которое выполняет задачи по ведению договоров, их обслуживанию, организации производства части оборудования, оптимизации логистики и таможенных издержек с целью сделать наше сотрудничество с российскими предприятиями наиболее комфортным и эффективным.

К.В. Покрышкин, АО «ВУХИН»

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОБЪЕКТОВ КОКСОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

ВУХИН имеет 87-летний опыт проведения научно-исследовательских работ и 20-летний опыт выполнения проектных работ.

За это время ВУХИН зарекомендовал себя как опытная проектная организация, выполняющая функции генпроектировщика. Силами института выполнены проекты ряда объектов коксохимических и химических предприятий в России и за рубежом.

ВУХИН выполняет полный комплекс инжиниринговых услуг:

- технологические обследования коксохимических производств;
- выполнение НИОКР;
- разработка технологических решений под конкретные условия Заказчика;
- разработка проектной и рабочей документации;
- разработка конструкторской документации, техпроектов нестандартизированного оборудования;
- сопровождение Госэкспертизы, экспертизы промбезопасности проектной документации;
- шеф-монтажные и пуско-наладочные работы с выходом на гарантийные показатели;
- поставки оборудования.

ВУХИН владеет не только традиционными для коксохимической промышленности технологическими решениями, но и имеет ряд собственных разработок, направленных, в том числе на снижение выбросов производства, улучшение условий труда. О некоторых из них я коротко сообщу.

1. КРУГОВОЙ ФОСФАТНЫЙ СПОСОБ ОЧИСТКИ КОКСОВОГО ГАЗА ОТ АММИАКА

Технология очистки коксового газа от аммиака круговым фосфатным способом позволяет снизить загрязнение окружающей среды специфическими вредными выбросами коксохимического производства (рис. 1).

Технология улавливания аммиака из коксового газа круговым фосфатным способом, основанная на абсорбции аммиака коксового газа ортофосфатными растворами с последующей их регенерацией, получении пароаммиачной смеси, термическом разложении (сжигании) аммиака пароаммиачной смеси в циклонном реакторе с последующей утилизацией тепла, призвана снизить загрязнение окружающей среды специфическими вредными выбросами коксохимического производства.

Новая технология установки обработки коксового газа, по сравнению с применяющимися в России технологиями улавливания аммиака, позволяет (на 100 тыс. $нм^3$/ч обрабатываемого газа):

- исключить расход концентрированной серной кислоты (более 30 тыс. т в год);
- исключить образование трудноутилизируемого отхода «кислой смолки»;
- получить до 16 т/ч перегретого водяного пара среднего давления за счет утилизации тепла от термического разложения аммиака;
- обеспечить современные требования эксплуатации производства по промышленной безопасности, защите окружающей среды, автоматизации.

Технологический процесс улавливания аммиака из коксового газа круговым фосфатным способом по разработкам ВУХИН реализован в промышленном масштабе в ПАО «КОКС» (г. Кемерово), ОАО «Губахинский кокс» (г. Губаха), на КХП ПАО «Северсталь» (г. Череповец).

Рис. 1. Отделение регенерации раствора ортофосфатов аммония КХП ПАО «Северсталь»

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ВЫБРОСОВ С УСТАНОВОК МОКРОГО ТУШЕНИЯ КОКСА

В ВУХИНе разработан новый тип отстойника воды мокрого тушения кокса от шламов, позволяющий минимизировать вредные выбросы при отстое воды. Технологическое решение возможно также реализовать на существующих отстойниках. Технологический процесс защищен патентом РФ.

Кроме того, имеется ряд разработок по изменению конструкций тушильных башен и систем орошения кокса, позволяющих снизить выбросы загрязняющих веществ.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 167117

УСТАНОВКА ДЛЯ ОТСТАИВАНИЯ ВОДЫ МОКРОГО ТУШЕНИЯ КОКСА ОТ ШЛАМОВ

Патентообладатель(ли): *Акционерное общество "Восточный научно-исследовательский углехимический институт" (АО "ВУХИН") (RU)*

Автор(ы): *Эскуз Владимир Исаакович (RU), Покрышкин Кирилл Викторович (RU)*

Заявка № 2015141097

Приоритет полезной модели 25 сентября 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 05 декабря 2016 г.

Срок действия патента истекает 25 сентября 2025 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности Г.П. Ивлиев

Рис. 2. В АО «ВУХИН» разработаны: новый тип отстойника воды мокрого тушения кокса от шламов; новая система орошения кокса водой в тушильных башнях

3. КОНЕЧНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ И НАФТАЛИНООЧИСТКА КОКСОВОГО ГАЗА

В 2015 году была реализована установка очистки коксового газа от нафталина и улавливания сырого бензола на Дургапурском металлургическом заводе в Индии.

Отличительная особенность заключается в том, что охлаждение и очистка коксового газа от нафталина проводится в одном аппарате соляровым маслом с обеспечением минимальных стоков с установки, содержания нафталина на выходе менее 50 мг/нм^3 и минимальных сопротивлений газовых аппаратов.

После пусконаладочных работ на Дургапурском металлургическом заводе участникам Проекта (BTL EPC LTD и АО «ВУХИН») в 2016 году выдан сертификат о достижении гарантийных показателей.

4. ДВЕРИ КОКСОВОЙ БАТАРЕИ МЕМБРАННОГО ТИПА ПОВЫШЕННОЙ ГАЗОПЛОТНОСТИ

Предлагаемая конструкция двери отличается от существующих тем, что разделена на две части корпуса и плиты с футеровкой и уплотняющей рамкой, соединенные между собой шарнирно. Между данными конструкционными частями образован воздушный зазор, разделяющий на две зоны с различными температурными условиями, что обеспечивает снижение динамических и температурных нагрузок на корпус двери. Наличие воздушного зазора позволяет выполнить корпус двери из стального проката.

Устанавливаются по сопрягаемой поверхности дверной рамы проема печи и обеспечивают герметичность в печи коксовой батареи при давлении 250 мм вод ст.

5. СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА КОКСОВОЙ БАТАРЕИ

Разработанная в ВУХИНе новая система работы газосборника коксовых печей отличается тем, что функцию регулирования гидравлического режима в каждой печной камере в отдельности обеспечивает механизм заслонки стояка для отвода газа из коксовой печи. В автоматическом режиме по схеме зон регулирования давления открытием-закрытием заслонки происходит регулирование поперечного сечения горловины стояка (рис. 3, рис. 4).

Преимущества новой системы работы газосборника:

- сокращение вредных выбросов в атмосферу в процессе коксования, особенно в момент загрузки;
- улучшение качества кокса, устраняются недопалы в подсводовом пространстве;
- улучшение качества каменноугольной смолы в результате снижения уноса угольной пыли в газосборник;
- снижение частоты чисток стояков отвода газа;
- увеличение сохранности кладки камер коксования и продление срока службы без текущего ремонта за счет устранения подсводовых перетоков газов между печными камерами, подсосов в дверных проемах и, как следствие, уменьшение локальных переохлаждений кладки.

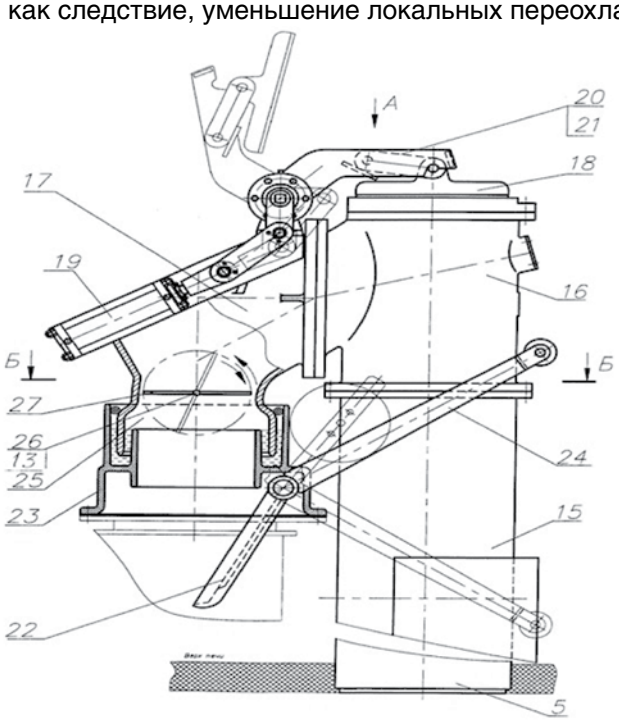


Рис. 3. Способ регулирования гидравлического режима коксовой батареи

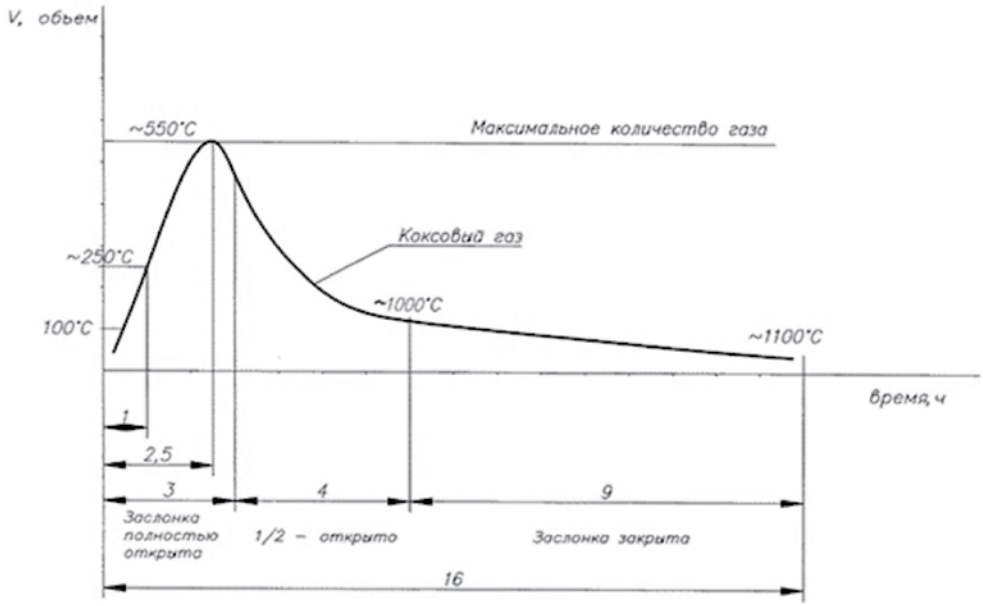


Рис. 4. Способ регулирования гидравлического режима коксовой батареи

6. КОНЕЧНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ КОКСОВОГО ГАЗА В АППАРАТАХ СПИРАЛЬНОГО ТИПА

Для решения проблемы исключения выбросов на КХП ПАО «ММК» были реализованы мероприятия по «закрытию» цикла конечного охлаждения с заменой конечных газовых холодильников (рис. 5). Рассматривались все существующие варианты технологических решений.

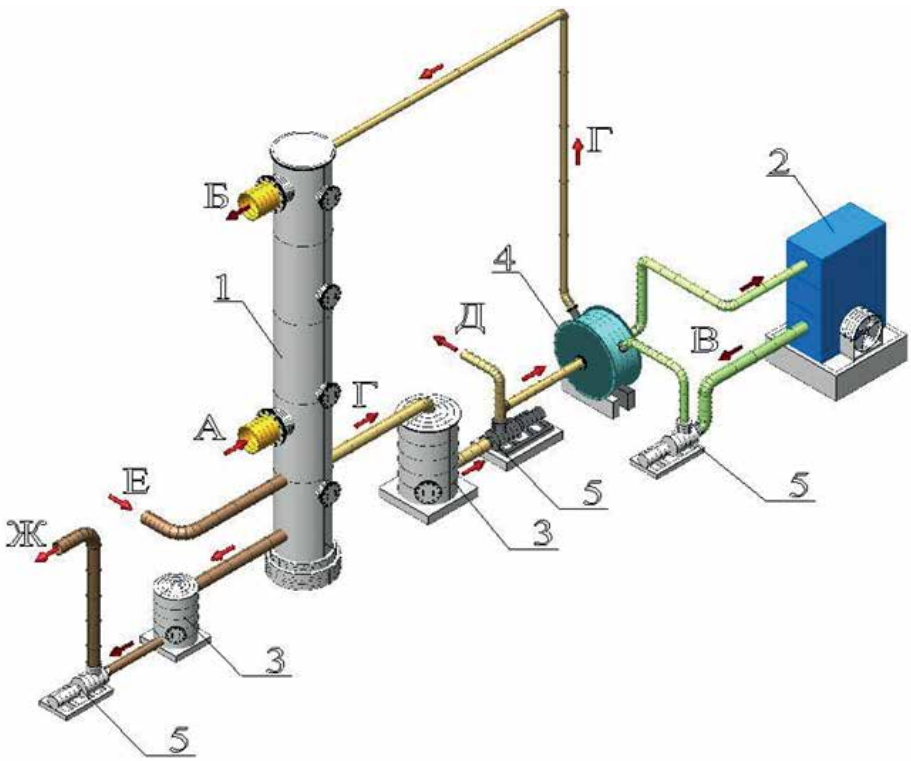


Рис. 5. Схема двухконтурного способа конечного охлаждения коксового газа

В настоящее время существует два варианта технологий «закрытия» цикла конечного охлаждения:

- типовой двухконтурный способ;
- новый современный одноконтурный способ.

Конечные холодильники в двухконтурном способе имеют большие габариты, технология требует установки блока теплообменников вода-вода, а также насосов и грязного, и чистого циклов, которые имеют практически одинаковую производительность. Кроме того, для обеспечения высокой эффективности теплообмена конечным холодильникам данного типа требуется периодическая очистка охлаждающего контура от отложений.

Более современной в настоящее время является одноконтурная технология закрытого цикла конечного охлаждения коксового газа. В этом способе коксовый газ охлаждается в конечном газовом холодильнике оборотной охлаждающей водой через стенку. Благодаря этому, охлаждающая вода не контактирует с коксовым газом и в нее не попадают загрязняющие вещества. Чистая, не контактировавшая с коксовым газом оборотная вода после КГХ поступает на градирни и затем насосами через фильтр подается опять на КГХ.

По сравнению с двухконтурной технологией закрытия цикла конечного охлаждения в одноконтурной отсутствует блок теплообменников, а также в два раза сокращается количество перекачиваемой воды, и, соответственно, и количество насосов, и затраты электроэнергии.

При выборе типа газового холодильника для одноконтурного способа закрытого цикла охлаждения коксового газа рассматривалось два реализованных в промышленности варианта:

- установка кожухотрубных холодильников с горизонтальным или вертикальным расположением труб;
- установка конечных газовых холодильников спирального типа.

У кожухотрубных газовых холодильников газ проходит через межтрубное пространство, а в спиральных — снаружи плоских спиралей, внутри которых проходит охлаждающая вода.

Спиральные теплообменники по сравнению с кожухотрубными имеют увеличенный коэффициент теплопередачи, позволяющий снизить в 2–4 раза поверхность охлаждения, а значит и габариты холодильника. Аппарат получается более компактный. Кроме того, спиральные теплообменники имеют способность к самоочистке.

После изучения достоинств и недостатков различных схем было принято решение в ЦУПХП КХП ПАО «ММК» на участке 1 блока улавливания заменить 4 конечных газовых холодильника непосредственного действия полчатого типа на 3 (два — рабочих, один — резервный) спиральных конечных холодильника производства фирмы NEXSON group.

Описанные технические решения были реализованы в установке конечного охлаждения коксового газа с закрытым циклом, пущенной в эксплуатацию в 2015 году в рамках экологической программы ОАО «ММК» в области охраны окружающей среды. Следует отметить, что на территории России данная технология охлаждения газа на установке закрытого цикла производительностью 180 тыс. нм^3/ч, реализована впервые. Проект привязки выбранного конечного газового холодильника с наружным оборудованием и оборотным водоснабжением был выполнен АО «ВУХИН».

Внедрение данной установки позволило обеспечить охлаждение до 130 тыс. нм^3/ч коксового газа до нормативных показателей и при этом полностью исключить выбросы с градирен открытого цикла конечного охлаждения газа.

АО «ВУХИН» с оптимизмом смотрит в будущее, совершенствует традиционные технологии и разрабатывает альтернативные пути дальнейшего развития института, проводит активный поиск новых партнеров.

А.С. Зайцев, Н.А. Гнатенко, ООО БМЗ «ПРОГРЕСС», г. Киев
В.В. Осипенко, С.В. Семирягин,
ООО НПП «ДНЕПРОЭНЕРГОСТАЛЬ», г. Запорожье

ВНЕДРЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ СУХОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ ЗОНЫ СПЕКАНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ МАШИНЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ

Металлургические комбинаты с полным металлургическим циклом производства, а также вертикально интегрированные металлургические компании, реализовавшие кооперацию в рамках полного металлургического цикла, составляют значительную долю в выпускаемой металлопродукции. Сырьевые материалы требуют предварительной подготовки по своим качественным параметрам, а именно:

— химическому составу (усреднение, обогащение)

— физическим свойствам (крупность, прочность)

Одним из основных металлургических переделов является подготовка железорудного сырья к дальнейшему применению в восстановительных технологиях. Агломерация железорудного сырья в полной мере позволяет получить металлургический полупродукт с заданными химическими и механическими свойствами. Агломерационное производство ввиду своих технологических особенностей, а именно: применения тонкодисперсных материалов, фазовых и агрегатных превращений, процессов термического разрушения, является одним из самых «грязных» металлургических переделов.

Технология агломерации неизбежно сопровождается выделением большого количества аспирационных пылевоздушных потоков, возникающих в точках пересыпа, грохочения, дробления, перегрузки, и технологических пылегазовых потоков, содержащих тонкодисперсную пыль и вредные химические соединения (оксиды серы, оксиды азота).

Для неорганизованных выбросов на агломерационном производстве успешно применяются сухие системы очистки на основе рукавных

фильтров или электрофильтров, на конвейерах устанавливаются локальные кассетные тканевые фильтры. Традиционно применяемые для технологических газопылевых потоков мокрые системы газоочистки не соответствуют современным экологическим трендам. Основной недостаток мокрых газоочисток заключается в том, что происходит перенос загрязнений из воздушной среды в водную, что требует последующего депонирования шламов, очистки воды на квазизамкнутом водооборотном цикле.

Можно с уверенностью утверждать, что разработка эффективных сухих или почти сухих (только дебет воды) систем очистки агломерационных технологических газов является актуальной инженерной задачей. Основными принципами при разработке данной технологии является энергоэффективность и технологическая приоритетность.

МЕТОДОЛОГИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ

Научно-производственное предприятие «Днепроэнергосталь», опираясь на научное наследие ВНИПИ «Черметэнергоочистки», на протяжении последних лет занимается внедрением сухих систем газоочисток во всех переделах металлургического производства. Разработаны и внедрены аппараты сухой очистки в сталеплавильном, ферросплавном, доменном, электросталеплавильном и агломерационном производствах.

Первая система сухой очистки технологических агломерационных газов на агломерационной машине площадью спекания 16,5 м^2 с применением рукавных фильтров с импульсной регенерацией была реализована на ОАО «Чусовской металлургический завод». В качестве пылеулавливающего аппарата для очистки газов, отбираемых из вакуум-камер агломерационной машины, применен рукавный фильтр, разработанный на базе корпуса электрофильтра ЭГА1-20-9-6-4-330-15А. Побудителем тяги в системе отбора газов является вентилятор ВКС-20К. Режим работы газоочистки устанавливался в зависимости от работы основного технологического агрегата (агломерационной машины), что влекло за собой изменение производительности в широком диапазоне от 60÷105,0 тыс. нм^3/ч (90÷175,0 тыс. м^3/ч). Удельная газовая нагрузка на фильтровальную ткань также изменялась в пределах 0,5÷0,97 м^3/м^2×мин. Фактическая запыленность технологических газов на выходе из сборного коллектора не превышает 300 мг/нм^3. Схема газоочистки технологических газов агломерационного отделения доменного цеха приведена на рис. 1.

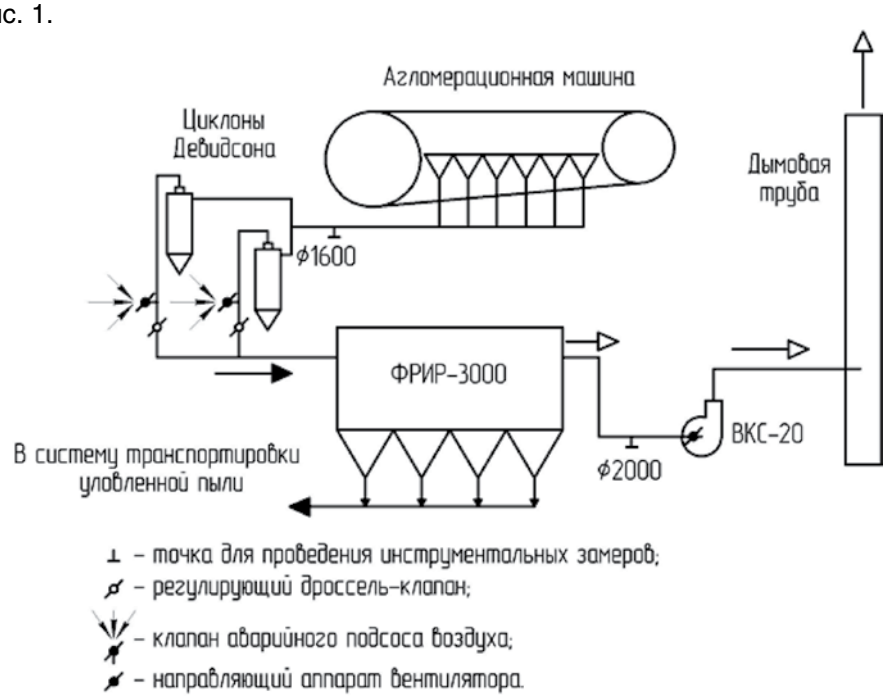


Рис. 1. Схема газоочистки технологических газов агломерационного отделения доменного цеха

Проектные параметры газоочистки приведены в таблице 1.

Таблица 1. Проектные параметры работы газоочистки

№ п/п	Наименование параметров	Ед. изм.	Параметры
1	Количество газов, поступающих на очистку (среднее)	нм³/ч	80 000,00
2	Температура газов, поступающих на очистку	°С	до 200
3	Запыленность газов, поступающих на очистку	г/нм³	до 10,0
4	Гидравлическое сопротивление рукавного фильтра	Па	до 2500
5	Остаточная запыленность	г/нм³	до 0,02

Газоочистка предусматривает отбор газов от 6 вакуум-камер агломерационной машины, двухступенчатую очистку: в одиночном циклоне Девидсона — 1 ступень (2 циклона, установленные параллельно), и в рукавном фильтре ФРИР-3000 — 2 ступень. Выброс в атмосферу очищенного газа осуществлялся через дымовую трубу Ø2,0 м и высотой 50,0 м. В случае превышения температуры технологических газов выше предела термостойкости фильтровального материала или предельной температуры для вентилятора предусмотрены клапаны аварийного подсоса атмосферного воздуха.

По результатам выполнения наладочных работ газоочистка технологических газов агломерационного отделения была выведена на оптимальный режим работы со следующими эксплуатационными параметрами (Таблица 2).

Таблица 2. Эксплуатационные параметры работы газоочистки технологических агломерационных газов

Параметр	Ед. изм.	Значение
Количество газов перед газоочисткой (max)	$\frac{м^3/ч}{нм^3/ч}$	$\frac{175\,000,0}{105\,000,0}$
Количество газов после рукавного фильтра ФРИР-3000 (max)	$\frac{м^3/ч}{нм^3/ч}$	$\frac{180\,000,0}{110\,000,0}$
Температура газов: • до газоочистки	°С	до 180
• перед вентилятором	°С	до 150
Сопротивление рукавного фильтра в период фильтрации, не более	Па	2000
Удельная газовая нагрузка на фильтровальную ткань фильтра, не более	м³/м²×мин	1,0
Запыленность (средняя) газов: • в коллекторе агломашины	г/нм³	0,27÷0,40
• после газоочистки	г/нм³	0,018
Эффективность работы газоочистки	%	93–96

Сухая очистка технологических агломерационных газов зоны спекания агломерационной машины внедрена на Богдановской обогатительно-агломерационной фабрике ПАО «Орджоникидзевский ГОК». В качестве пылеочистных аппаратов технологических газов использованы горизонтальный циклон-искрогаситель ЦГ-450 (I ступень очистки) и рукавный фильтр типа ФРИР-7700 (II ступень очистки).

Запыленный воздух от тринадцати вакуум-камер агломашины по газоходу Ø2800 мм поступает на первую ступень очистки циклона-искрогасителя ЦГ-450, где происходит отделение летящих искр и крупных частиц пыли. После циклона пылегазовоздушная смесь поступает на очистку в рукавный фильтр ФРИР-7700, где происходит тонкая очистка. Очищенная газовоздушная смесь через выхлоп-

ную трубу (∅4,2 м, Н=100,0 м) выбрасывается в атмосферу. Поддержание заданного разрежения в вакуум-камерах осуществляется с помощью эксгаустера DHRV-35-1400/K. Объем технологических газов, поступающих на очистку от четырнадцати вакуум-камер агломашины, составляет 423,59 тыс. м³/ч (280,0 тыс. нм³/ч).

Принципиальная схема очистки и отбора газа представлена на рисунке 2.

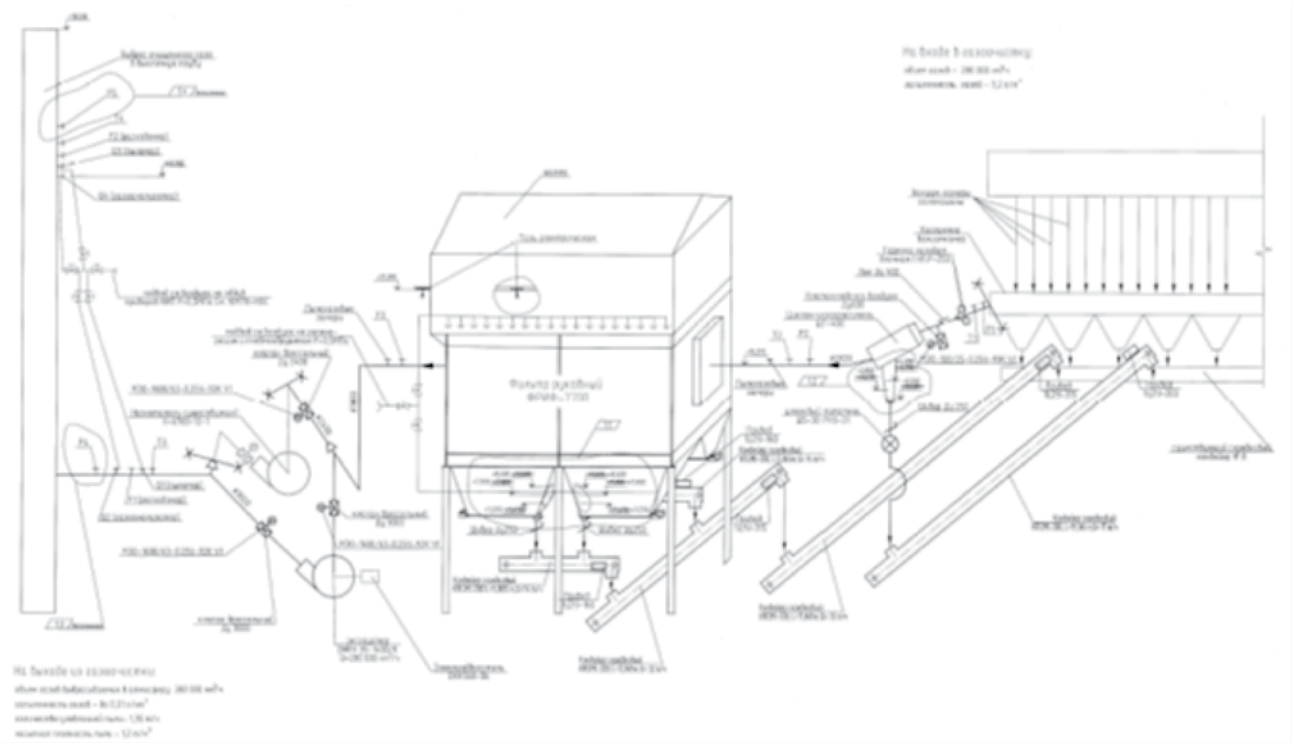


Рис. 2. Схема газоочистки агломерационных газов зоны спекания агломерационной машины Богдановской обогатительно-агломерационной фабрики ПАО «Орджоникидзевский ГОК»

Таблица 3. Проектные параметры работы газоочистки

№ п/п	Наименование параметров	Ед. изм.	Параметры
1	Количество газов, поступающих на очистку	м³/ч нм³/ч	423 000,59 280 000,00
2	Температура газов, поступающих на очистку	°С	80÷140
3	Запыленность газов, поступающих на очистку	г/м³	3,2
4	Гидравлическое сопротивление рукавного фильтра	Па (мм вд. ст.)	до 3000 (300)
5	Остаточная запыленность	г/м³	до 0,01

При нештатных режимах работы агломашины имеют место пиковые кратковременные колебания температур до 250°С. С целью защиты рукавов от прожога на газоходе перед рукавным фильтром устанавливается клапан подсоса воздуха, который автоматически срабатывает при повышении температуры свыше 200 °С. В случае понижения температуры ниже 80 °С в автоматическом режиме включаются 2 газовые горелки, которые оснащены датчиком контроля пламени и электрическим запальником. При достижении температуры газа выше 80 °С горелки отключаются. Таким образом, достигается оптимальный температурный режим работы рукавов в диапазоне 80–200 °С.

Следующим этапом эволюции технических решений в части реализации технологий сухой очистки агломерационных газов является внедренный с участием ООО БМЗ «Прогресс» (г. Киев) проект комплексной очистки агломерационных газов от пыли и оксидов серы на агломерационных машинах № 1–6 ПАО «Запорожсталь» (г. Запорожье). В рамках данного проекта была реализована концепция двух стадийной очистки газов, отбираемых от эксгаустера агломерационной машины, с возвратом части газов под укрытие агломашины. Отличительной особенностью технологии являлся то, что на первой и второй ступенях чистки служат рукавные фильтра. Подача реагента (гашеной извести) производится между первой и второй ступенями в специально выполненный адсорбер типа «ПРОГРЕСС» который работает по технологии полусухого улавливания оксидов серы. При данной компоновке каждая из ступеней улавливает различный тип пыли. Первая ступень — пыль агломерационного производства (оксиды железа, углеродсодержащая пыль); вторая ступень — пыль, состоящая из гашеной извести и кальцийсодержащих продуктов улавливания оксидов серы (гипсовые соединения). Система раздельного пылеудаления позволяет пыль первой ступени отгружать в отвал, а второй ступени использовать повторно либо выводить из оборота.

Для обеспечения необходимого аэродинамического режима работы газоочистки по тракту были установлены две тягодутьевые машины, обеспечивающие заданный напор после первой ступени, а также после реактора сероочистки и второй ступени очистки. Технологическая схема газоочистки представлена на рисунке 3, а компоновочное решение представлено на разрезе (рисунок 4).

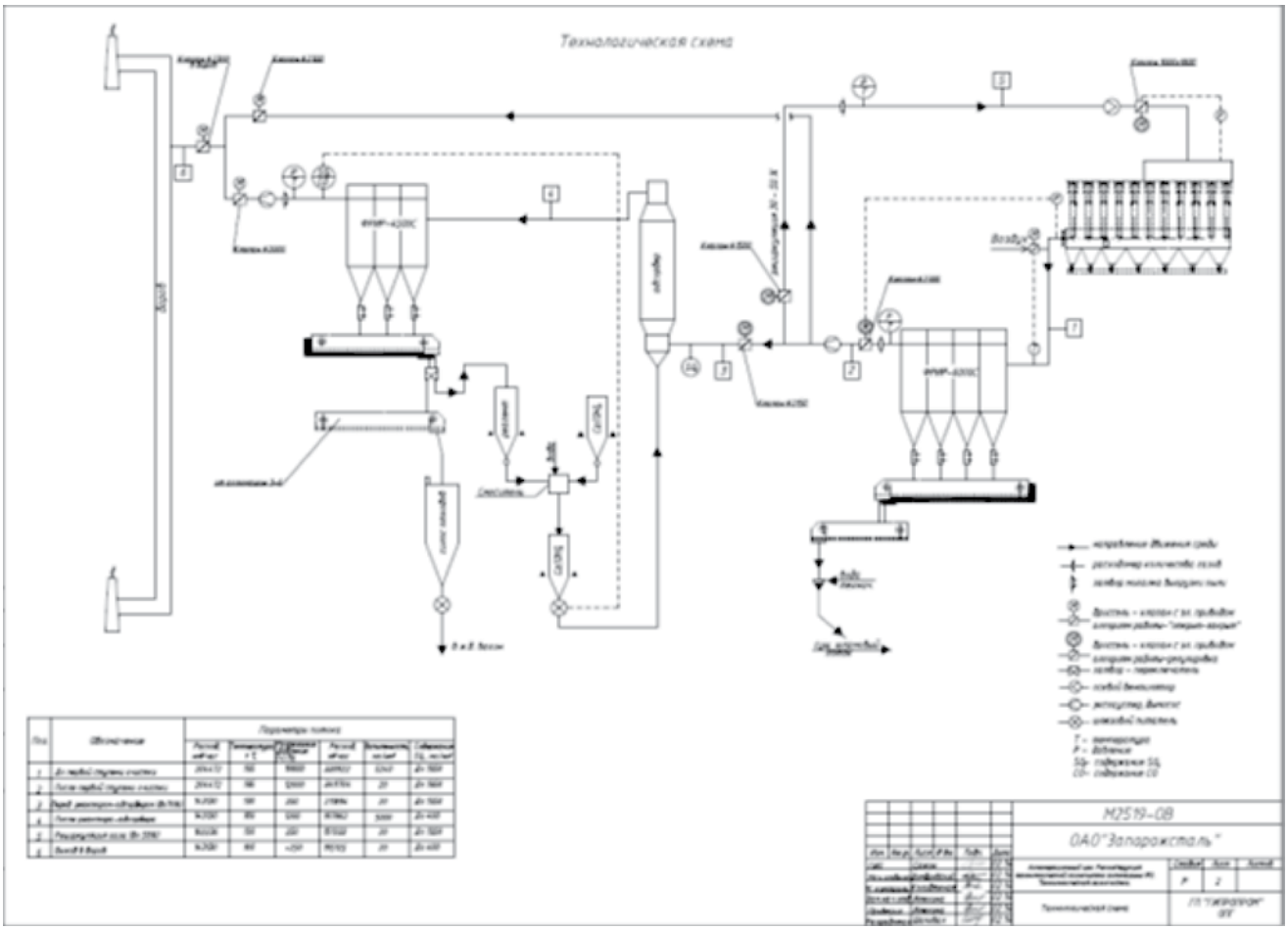


Рис. 3. Технологическая схема газоочистки агломерационных газов агломерационных машин № 1– 6 агломерационного цеха ПАО «Запорожсталь»

Ввиду ограниченного пятна застройки действующего производства, компоновка газоочистки была решена в вертикальной оси, что позволило минимизировать расстояния между ступенями очистки.

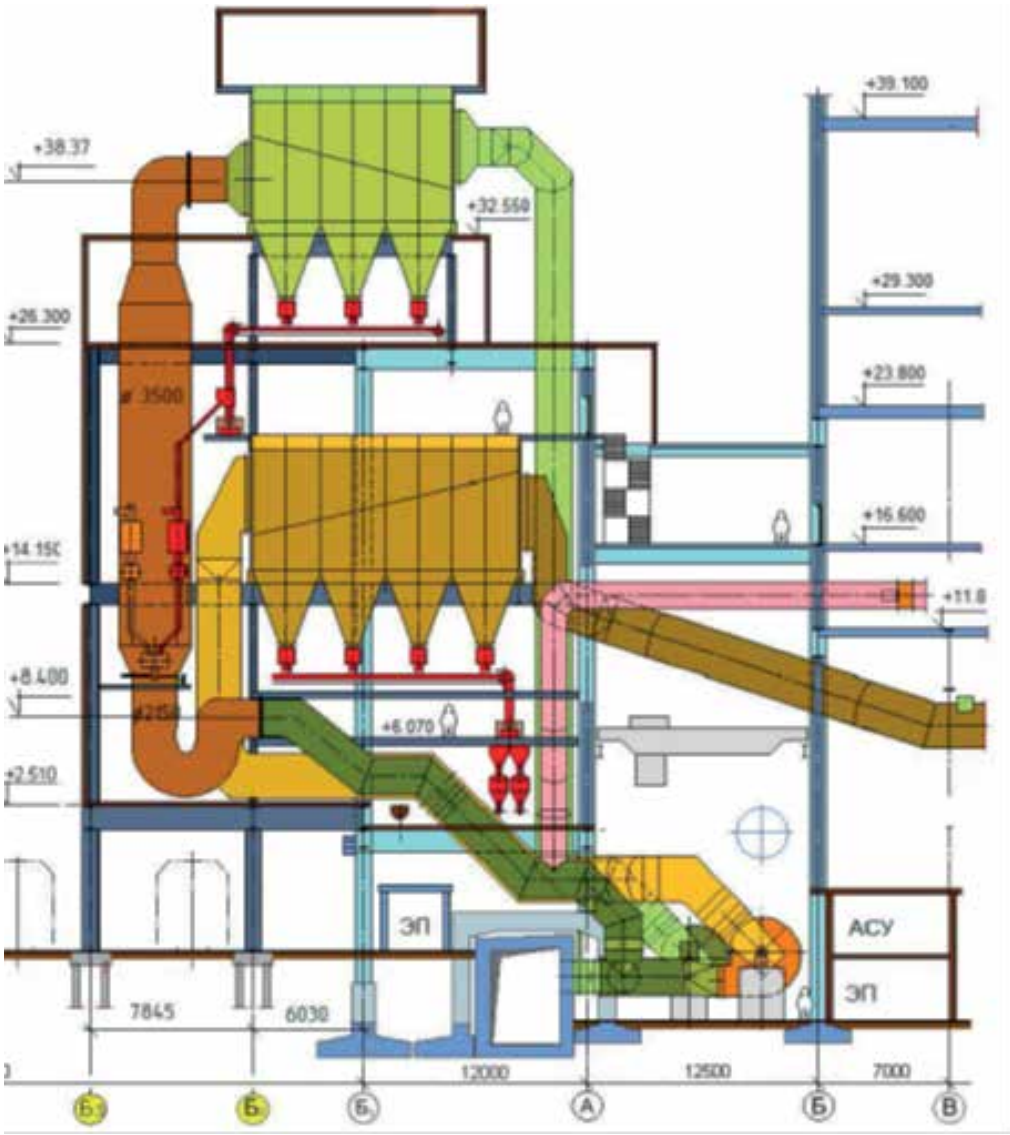


Рис. 4. Разрез по технологической лини газоочистки агломерационных газов агломашин № 1–6 агломерационного цеха ПАО «Запорожсталь»

Таблица 4. Проектные параметры работы газоочистки

№ п/п	Наименование параметров	Ед. изм.	Параметры
1	Количество газов, поступающих на очистку	$\frac{м^3/ч}{нм^3/ч}$	$\frac{320\,000{,}00}{205\,000{,}00}$
2	Температура газов, поступающих на очистку	°С	135÷250
3	Запыленность газов, поступающих на очистку	г/м³	5,25
5	Остаточная запыленность	мг/м³	до 40,0
6	Содержание SO_2	мг/м³	1500–2000
7	Остаточное содержание SO_2	мг/м³	менее 400

ВЫВОД

1. Рукавные фильтры с импульсной регенераций являются эффективными аппаратами очистки технологических агломерационных газов, отводимых от зоны спекания агломерационной машины. Применение рукавных фильтров в технологии позволяет получить остаточное содержание пыли в отходящих газах не более 20 мг/м^3.
2. Технология очистки технологических агломерационных газов требует обязательной установки аппаратов искрогашения и устройств охлаждения газов при пиковых значениях температуры.
3. Наиболее эффективной схемой организации очистки технологических агломерационных газов является двухступенчатая очистка с возвратом очищенных газов первой ступени (до 50%) под укрытие агломерационной машины и очисткой перед второй ступенью от сернистых соединений.

Раздел III
ТЕХНОЛОГИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ И ТЕНДЕНЦИИ ЕЕ РАЗВИТИЯ

С.В. Филатов, А.И. Дагман, В.Н.Титов, ПАО «НЛМК»
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА НА ПАО «НЛМК» 78

К.В. Миронов, А.А.Форшев, АО «Евраз НТМК»
С.А. Загайнов, Б.С. Тлеугабулов, УрФУ
СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩИХ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ 84

К.В. Миронов, АО «ЕВРАЗ НТМК»
Б.С. Тлеугабулов, Л.Ю. Гилева, В.А. Михалев, УрФУ им. Б.Н. Ельцина
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАВКИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ 91

С.К. Сибагатуллин, А.С. Харченко, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
А.А. Полинов, Д.И. Селезнев, М. Семенюк, ПАО «ММК»
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОСТУПЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ШИХТЫ ПО КРУПНОСТИ ИЗ БУНКЕРА БЗУ В КОЛОШНИКОВОЕ ПРОСТРАНСТВО ПЕЧИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ЗАГРУЗКИ 98

А.А. Буткарев, ОАО «ВНИИМТ»
РЕЗЕРВЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕГО ДУТЬЯ ЗА СЧЕТ ВНЕДРЕНИЯ ПОДСИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМИ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯМИ 107

В.Г. Дружков, И.В. Макарова, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
И.Е. Прохоров, ПАО «ММК»
ПРИЧИНЫ НИЖНИХ ПОДВИСАНИЙ ШИХТЫ В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ И ПУТИ СНИЖЕНИЯ ИХ ВЕРОЯТНОСТИ 112

А.Ю. Чернавин, В.А. Кобылев, Д.А. Чернавин, ООО «ПРОМИНТЕХ-НКА»
ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОКСА, ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ШИХТЫ И РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ 115

С.В. Филатов, А.И. Дагман, В.Н. Титов, ПАО «НЛМК»

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА НА ПАО «НЛМК»

Применение в доменных печах ПАО «НЛМК» кокса удовлетворительного качества с горячей прочностью 60–65% позволило повысить интенсивность доменной плави и использовать резервы повышения ее эффективности, связанные со снижением удельных потерь тепла, повышением степени использования газа, давления газа на колошнике и вдуванием пылеугольного топлива. В результате в 2018 г. на доменных печах достигнут расход кокса 325 кг/т передельного чугуна.

Благодаря противоточному характеру процессов тепло- и массообмена в доменной печи (ДП), этот агрегат обладает самым долговечным и энергоэффективным металлургическим процессом. За последние 250 лет средние энергозатраты на выплавку чугуна в ДП снизились в 15 раз (с 300 до 20 ГДж/т чугуна). На некоторых ДП энергозатраты составляют только 15 ГДж/т [1]. Эффективность восстановительного процесса в лучших ДП, работающих с применением хорошо подготовленных железорудных материалов и кокса с высокой горячей прочностью (CSR>65%), близка к термодинамическому пределу [2]. Средняя степень приближения состава газа в реакции восстановления вюстита, определяющей потребность процесса в восстановителе, на ДП ПАО «НЛМК» в последние три года составляет 97–98%, достигая в отдельные месяцы 99% (рисунок 1) [3].

Основное количество стали в мире (73,9% в 2015 году) выплавляется в конвертерах из доменного чугуна, доля которого в металлошихте для выплавки всей стали составляет 63,8% [2]. С учетом этого, главной задачей совершенствования технологии доменной плавки для доменщиков по-прежнему остается снижение энергетических затрат на выплавку чугуна, которые составляют подавляющую часть энергозатрат на выплавку конвертерной стали.

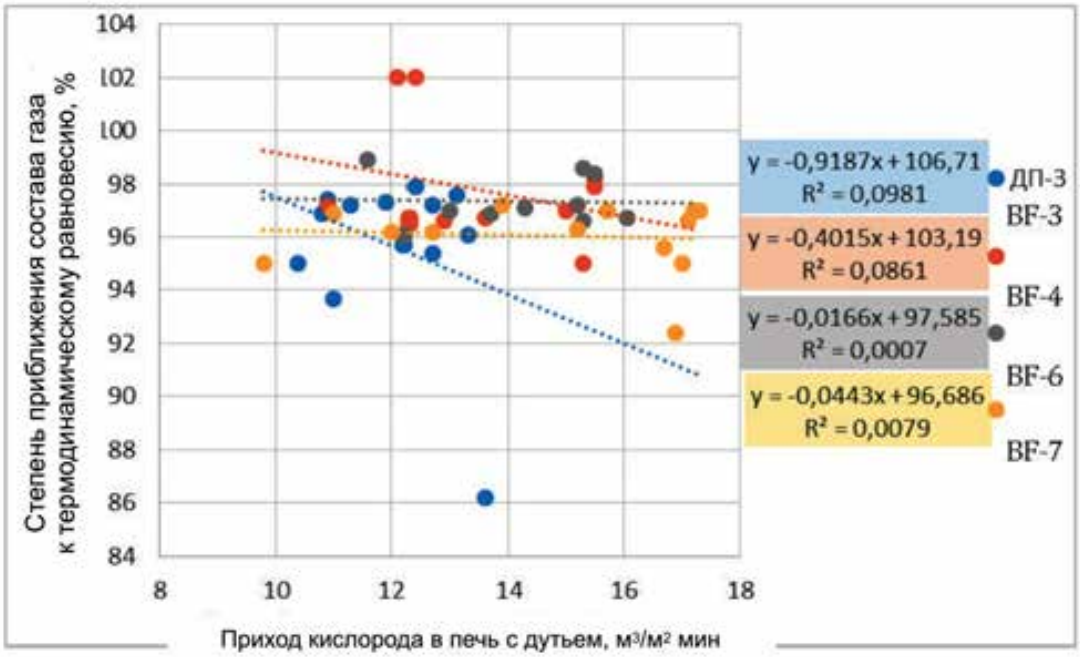


Рис. 1. Эффективность реакции восстановления вюстита

Принимая во внимание возрастание требований к черной металлургии по снижению эмиссии CO_2, вклад которой в глобальную эмиссию этого газа техногенного происхождения составляет 7% [4], энергозатраты на выплавку 1 т чугуна удобно оценивать величиной суммарного расхода углерода.

Возможности снижения энергозатрат за счет повышения содержания железа в шихте практически исчерпаны. Это объясняется, в первую очередь, значительным ростом себестоимости концентрата, а также и тем, что прочность агломерата, как и прочность окатышей, зависит от количества образующейся при спекании агломерата и обжиге окатышей жидкой минеральной фазы, содержание которой сокращается при повышении содержания железа [5].

В конкретных условиях работы ДП ПАО «НЛМК» в качестве одного из приоритетных направлений повышения энергоэффективности работы доменных печей выбраны режимы с максимальной форсировкой процесса. Это достигается за счет повышения давления под колошником при увеличении горячей прочности кокса.

Повышение давления под колошником является одним из путей повышения интенсивности плавки и снижения потерь тепла. Теоретический анализ условий, обеспечивающих эффективную работу доменных печей и сопоставление показателей их работы при различном давлении под колошником (таблица 2) приведен в работе [6]. Для сопоставления выбирались периоды работы с давлением под колошником ± 10 кПа от средних значений при максимальном и среднем за период давлении.

Таблица 1. Показатели работы печей при разном качестве кокса

Показатели	Доменные печи					
	ДП-4		ДП-6		ДП-7 «Россиянка»	
Давление под колошником, кПа	150	170	154	196	168	240
Удельный суммарный расход углерода топлива, кг на тонну чугуна	413,7	386,7	408,7	400,2	433,1	412,3
Удельная производительность, т/(м² сутки)	61,63	74,11	68,42	77,27	65,59	93,02
CSR,%	52	63	49	61	52	62

Эффективность повышения давления под колошником подтверждается производственными данными (рисунок 2 и 3) [6].

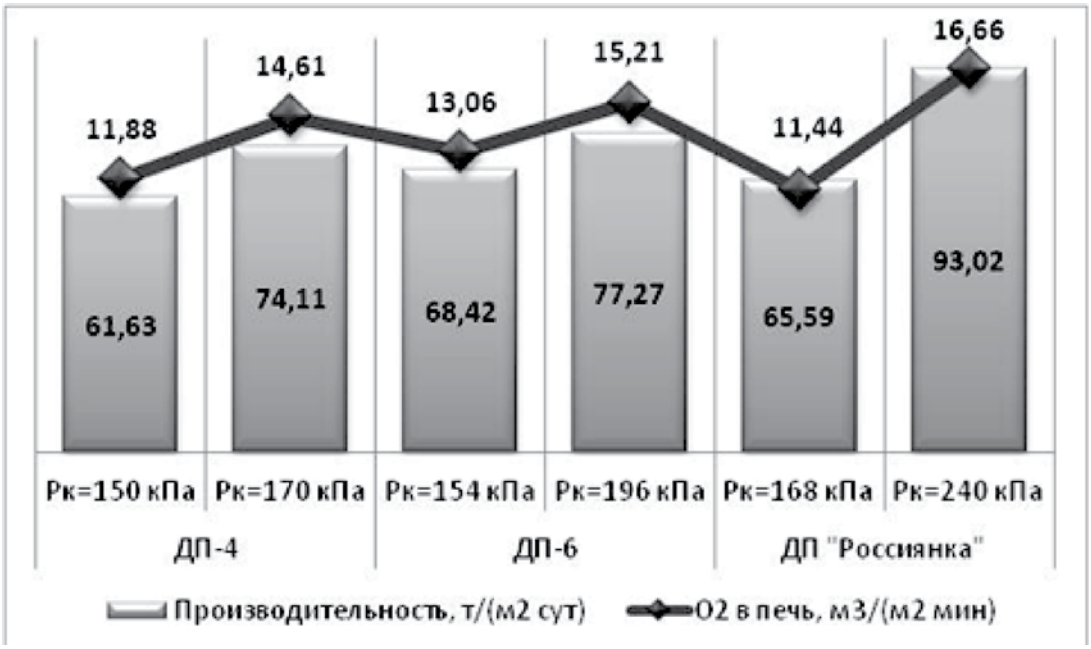


Рис. 2. Производительность доменной печи и количество вдуваемого в печь кислорода при разном уровне давления газа под колошником

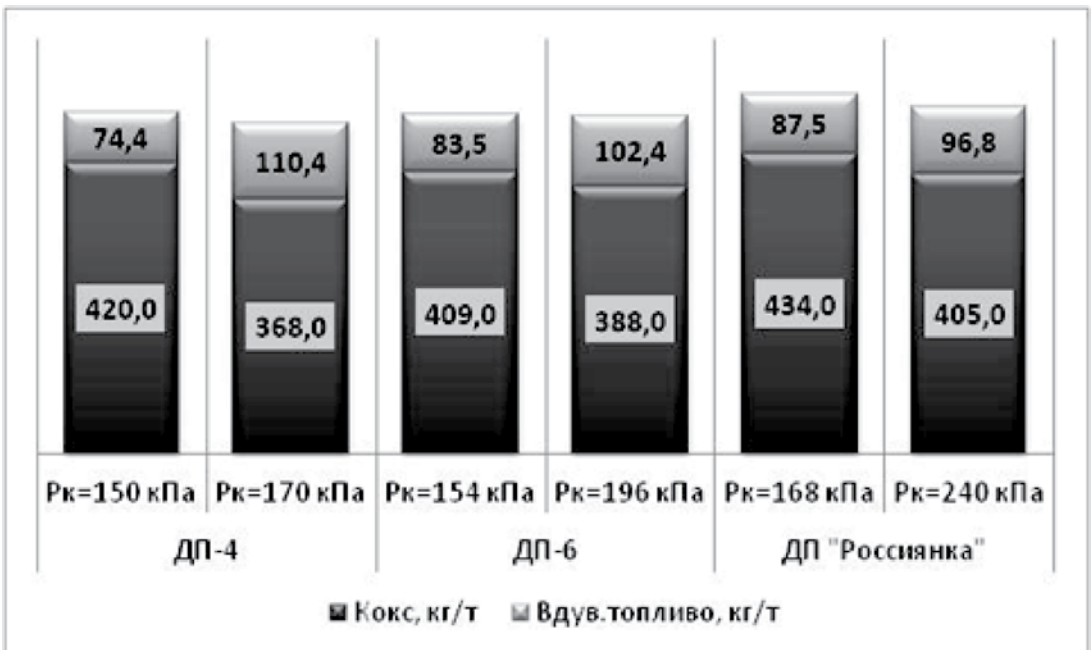


Рис. 3. Удельные расходы кокса и вдуваемого топлива при разном уровне давления газа под колошником

Одним из основных путей повышения энергоэффективности выплавки чугуна является повышение степени использования CO. Это может быть реализовано как за счет смещения равновесия реакции $FeO + CO = Fe + CO_2$ в зону более низких температур, т.е. за счет снижения температуры в изотермической зоне, так и за счет увеличения времени пребывания шихты в зоне косвенного восстановления.

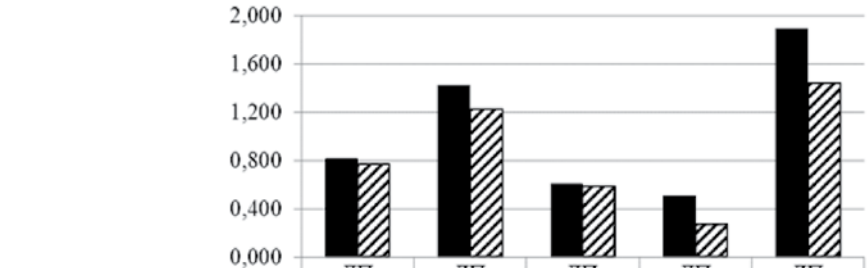
Взаимосвязь времени пребывания шихты в печи с изменением степени использования CO описывается уравнением [7]:

$$\Delta\eta_{co} = \frac{\eta_{co}^{p}}{\eta_{co}} \cdot \frac{k \cdot e^{k\cdot\tau}}{(e^{k\cdot\tau} - 1)} \cdot \Delta\tau$$

где k — константа скорости реакции, определяемая по данным о работе доменных печей с привлечением натурных данных; η_{CO}^{P} и η_{CO} — равновесная и фактическая степень использования CO для реакции $FeO+CO=Fe+CO_2$.

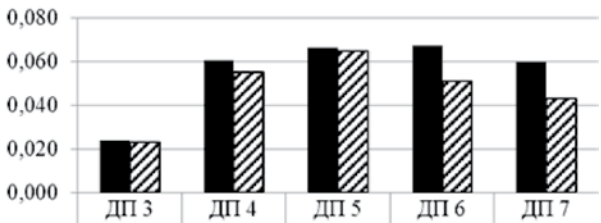
Из приведенного уравнения можно понять, что влияние времени пребывания шихты в печи на развитие реакций косвенного восстановления в меньшей мере проявляется при приближении реакции $FeO+CO=Fe+CO_2$ к равновесию. На ДП ПАО «НЛМК» значения $\frac{\eta_{CO}^{P}}{\eta_{CO}}$ в рассмотренные периоды их работы составляли 1,04–1,07, что соответствует степени приближения состава газа к равновесному составу (0,96–0,93).

Производственные данные в данные периоды работы ДП в полной мере подтверждают тот факт, что при высокой интенсивности плавки колебания степени использования CO и содержания кремния в чугуне ниже, чем в среднем за 2017 г. (рисунок 4 и 5).



	ДП 3	ДП 4	ДП 5	ДП 6	ДП 7
Среднеквадратичное отклонение степени использования CO, %	0,814	1,427	0,613	0,512	1,894
Среднеквадратичное отклонение степени использования CO при высокой интенсивности, %	0,774	1,224	0,590	0,273	1,439

Рис. 4. Среднеквадратичное отклонение степени использования CO в зоне восстановления вюстита



	ДП 3	ДП 4	ДП 5	ДП 6	ДП 7
Среднеквадратичное отклонение [Si]	0,024	0,060	0,066	0,067	0,060
Среднеквадратичное отклонение [Si] при высокой интенсивности плавки	0,023	0,055	0,065	0,051	0,043

Рис. 5. Среднеквадратичные отклонения содержания кремния в чугуне

При высокой интенсивности плавки появилась возможность поддержания оптимального уровня содержания кремния в чугуне (0,4% в ПАО «НЛМК»).

При повышении интенсивности доменной плавки наблюдается снижение потерь тепла, что отмечалось еще А.Д. Готлибом, по данным которого при неизменных шихтовых условиях работы печи потери тепла обратно пропорциональны ее производительности [8]. Косвенным подтверждением этого являются результаты сопоставления среднего суммарного расхода углерода в «периоды» работы печей с «высокой» и «низкой» производительностью (Таблица 2). Названные периоды получены путем формирования выборки среднесуточных данных из рассмотренных периодов работы печей без остановок и тихих ходов и при одинаковых уровнях температуры дутья и содержания железа в офлюсованной шихте. После определения средней производительности в выборке делением ее на два с производительностью выше и ниже средней получили «периоды» со средней «высокой» и «низкой» суточной производительностью и средними значениями суммарного расхода углерода в эти «периоды».

Таблица 2. Средний суммарный расход углерода в «периоды» работы печей с «высокой» и «низкой» производительностью

	Суточное производство, т/сутки	Суммарный расход углерода топлива, кг/т чугуна
ДП 3	5068	428
	4409	437
ДП 4	5943	402
	5650	404
ДП 5	8309	400
	7760	412
ДП 6	8796	411
	7721	420
ДП 7	12555	418
	11401	427

По приведенным данным можно сделать вывод, что в условиях ПАО «НЛМК» при работе печей с высокой интенсивностью значительное влияние на суммарный расход углерода оказывают потери тепла.

Одним из направлений повышения энергоэффективности доменного процесса является частичная замена кокса и природного газа пылеугольным топливом. На одну тонну скипового кокса расходуется 1500–1600 килограмм углей. Один килограмм пылеугольного топлива заменяет 0,85–0,95 килограмм кокса. Поэтому технология доменной плавки с использованием пылеугольного топлива позволяет существенно снизить общие затраты углерода на производство чугуна.

Анализ работы доменных печей показал, что между расходом ПУТ и суммарным расходом углерода наблюдается экстремальная зависимость. Пример зависимости между расходом ПУТ и суммарным расходом углерода приводится на рисунок 6.

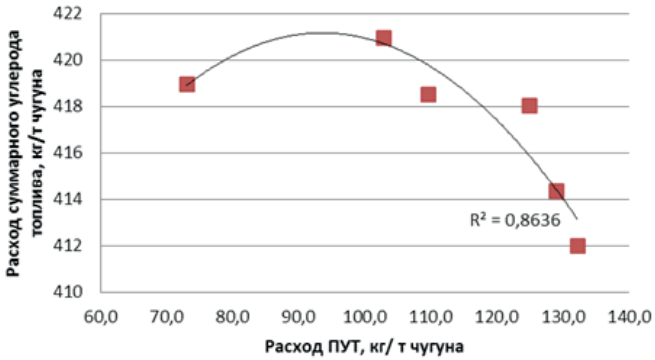


Рис. 6. Зависимость между расходом ПУТ и суммарным расходом углерода

Таким образом, высокоинтенсивная работа доменных печей на коксе с высокой горячей прочностью при максимально возможном давлении под колошником и использовании пылеугольного топлива позволила за период с 2012 по 2018 года снизить удельный расход кокса более чем на 100 килограмм на тонну чугуна, расход суммарного углерода топлива — более чем на 30 килограмм на тонну чугуна и повысить стабильность химического состава продуктов плавки.

Список литературы

1. Barbara Rammer, Robert Millner, Christian Boehm. Comparing the CO_2 Tmission of Different Ironmaking Rout. Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress — ECIC 2016. P. 284–291.
2. P. Schmole. The Blast Furnace — Fit for Future. Proceeding of the 7th Europeaen Coke and Ironmaking Congress — ECIC 2016. P. 3–12.
3. Курунов И.Ф., Филатов С.В., Тихонов Д.Н. Басов В.И. Интенсивность доменной плавки и эффективность косвенного восстановления. Сталь № 8, 2016 г., с. 26–31.
4. Adeline Morcel, Lena Sundqvist Okvist, Joel Orre, Bo Bjorkman, Per Lagrerwall. Low CO2 Ironmaking in the Blast Furnace. Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress — ECIC 2016. P. 274–283.
5. Клейн В.И., Боковиков Б.А., Евстюгин С.Н., Кутузов А.А., Берсенёв И.С. Теплотехника процессов агломерации / Под редакцией Б. А. Боковикова. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. 267 с.
6. Филатов С.В., Загайнов С.А., Гилева Л.Ю., Курунов И.Ф., Титов В.Н. Влияние повышенного давления в доменной печи на эффективность её работы. Сталь. 2015. № 4. С. 11–14.
7. Филатов С.В., Загайнов С.А., Гилева Л.Ю., Пыхтеева К.Б. Разработка методики анализа процессов восстановления оксидов железа. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 9. С. 658–661.
8. Готлиб А.Д. Доменный процесс. М.: Металлургия 1966. – 503 с.

К. В. Миронов, А.А. Форшев, АО «ЕВРАЗ НТМК»
С.А. Загайнов, Б.С. Тлеугабулов, УрФУ им. Б.Н. Ельцина

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ВАНАДИЙСОДЕРЖАЩИХ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ

Доменное производство АО «ЕВРАЗ НТМК» специализируется на выплавке передельного ванадийсодержащего чугуна из Качканарских титаномагнетитов. При выплавке чугуна из ванадийсодержащих титаномагнетитов достигнута удельная производительность доменных печей более 3,2 т/м^3 и удельный расход суммарного углерода топлива менее чем 415 кг на тонну чугуна. Эти показатели достигнуты после реконструкции доменных печей и являются одними из лучших в мире [1].

Комплексный подход к решению задачи повышения эффективности выплавки чугуна из руд Качканарского месторождения в условиях АО «ЕВРАЗ НТМК» реализован путем внедрения новых конструкторских и технологических решений на базе научных исследований [2].

Специфика ванадиевой плавки связана с наличием в шихте титана, который ограниченно растворяется в чугуне и в доменной печи образует гамму оксидов и тугоплавких соединений — нитридов и карбонитридов, что в обычных условиях приводит к повышенным потерям ванадия и металла со шлаком, нарушениям работы горна печей, осложнениям при выпуске продуктов плавки. Теоретические основы технологии переработки ванадийсодержащих титаномагнетитов разработаны на Урале [3–5].

Расчет равновесия реакций восстановления оксидов титана показал, что основной реакцией, по которой оксиды титана восстанавливаются и переходят в чугун, является реакция [6]:

$$TiO + C = TiC + CO. \quad (1)$$

Зависимость равновесной концентрации титана от температуры и давления приводятся на рисунках 1 и 2.

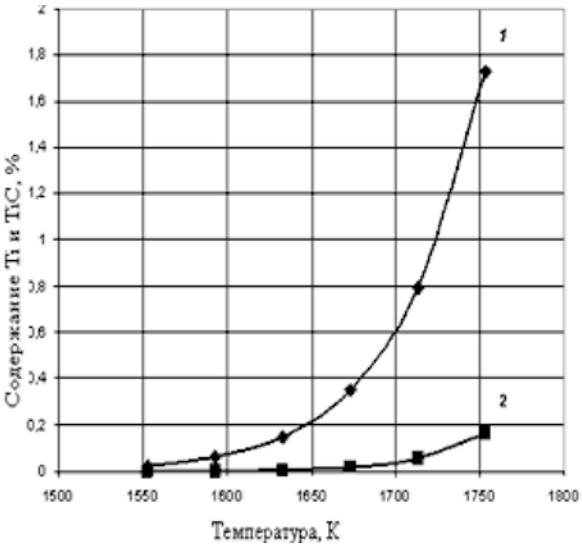


Рис. 1. Влияние температуры на восстановление Ti и TiC:
1 — для реакции TiO + C = TiC + CO;
2 — для реакции TiO_2 + 2Fe = Ti + 2FeO

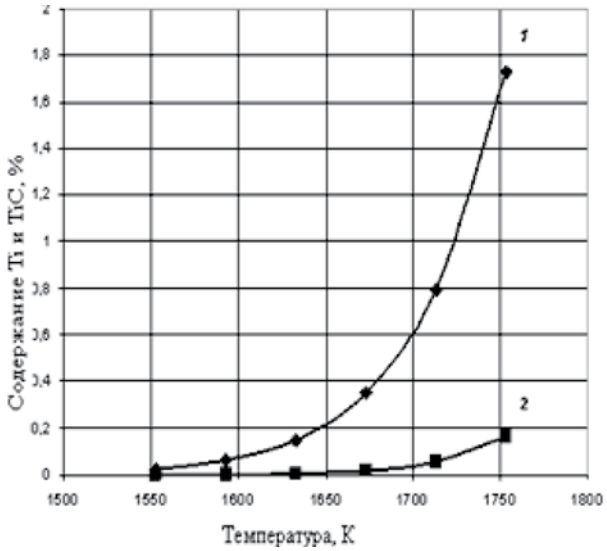


Рис. 2. Влияние давления на восстановление Ti и TiC:
1 — для реакции TiO + C = TiC + CO;
2 — для реакции TiO_2 + 2Fe = Ti + 2FeO

Полученные данные показывают, что повышение давления и снижение температуры в зоне восстановления оксидов титана препятствуют, в первую очередь, образованию карбидов титана. Теоретическое подтверждение существенного влияния давления на образование карбидов титана позволило обосновать необходимость использования бесконусных загрузочных устройств на реконструируемых доменных печах. На выявленной зависимости степени восстановления титана от температуры основан переход на выплавку низкокремнистых чугунов [7].

Таким образом, термодинамический анализ поведения оксидов титана в доменной печи показал, что основными мерами, способствующими снижению титана и карбида титана в чугуне, являются повышение давления в доменной печи и работа доменной печи с низкими температурами в зоне восстановления оксидов титана.

Фактическая концентрация титана в чугуне составляет порядка 0,15%. В рамках формальной кинетики восстановительных процессов количество восстановленного элемента определяется как интеграл от времени:

$$X(\tau) = \int_0^{\tau} k(X_{равн} - X)d\tau \qquad (2)$$

Исходя из того, что разница между равновесным и фактическим содержанием титана в чугуне весьма существенна, то время контакта расплава с коксовой насадкой можно рассматривать в качестве доминирующего фактора в процессах карбидообразования [8, 9].

Отсюда можно сделать вывод, что восстановление титана определяется кинетикой процесса, а именно временем пребывания оксидного расплава в области повышенных температур. Данное заключение подтверждают практические данные о влиянии производительности доменной печи № 6 АО «ЕВРАЗ НТМК» на соотношение содержания оксида титана в шлаке к содержанию титана в чугуне (рисунок 3).

Основными способами повышения интенсивности доменной плавки являются: повышение давления под колошником; обогащение дутья кислородом; повышение скорости фильтрации через коксовую насадку за счет оптимизации свойств шлака и повышения горячей прочности кокса.

Работа доменной печи с высоким давлением под колошником, обеспечивается за счет использования бесконусного засыпного аппарата. Эффективность работы доменной печи с повышенным давлением под колошником приводится на рисунке 4.

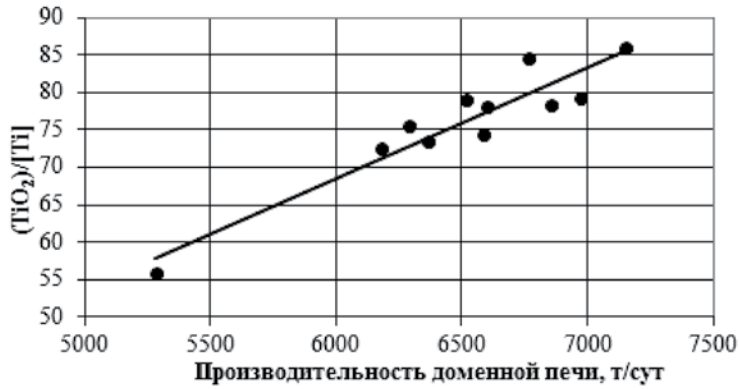


Рис. 3. Влияние производительности доменной печи на восстановление титана

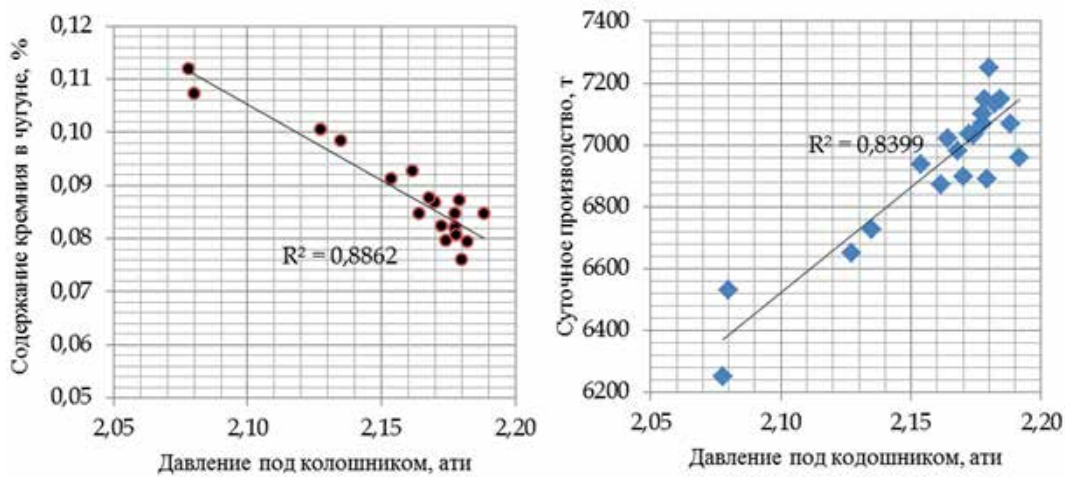


Рис. 4. Влияние давления под колошником на содержание кремния в чугуне и производительность доменной печи

Вопрос работы доменных печей с использованием обогащения дутья кислородом подробно рассмотрен в работе [9]. При этом делается вывод о том, что повышение теоретической температуры фурменной зоны выше определенного значения приводит к образованию карбидов титана, и поэтому содержание кислорода в дутье выше 25% недопустимо.

Вопрос о возможности использования кислорода для повышения производительности доменной печи рассматривался в рамках закономерностей теплообмена в слое.

Дифференциальное уравнение, описывающее изменение температуры шихты ($t_ш$) по высоте печи, имеет следующий вид

$$\frac{dt_ш}{dh} = \frac{\alpha}{w_ш \cdot c_{каж}}(t_г - t_ш), \quad (3)$$

где α — коэффициент теплопередачи, Вт/м³К; $w_ш$ — скорость движения шихты, м/сек; $c_{каж}$ — кажущаяся теплоемкость шихты, Дж/м³К; $t_г$ — температура газа на входе в слой.

Условия, при которых увеличение теоретической температуры горения не изменяет температуру шихты на выходе из слоя, соблюдаются постоянством $\frac{dt}{dh}$. Кажущаяся теплоемкость шихты зависит от количества восстановленных примесей, удельного выхода шлака и удельного расхода кокса. Расчеты показали, что при изменении удельного расхода кокса на 10 кг/т чугуна $C_{каж}$ изменится не более чем на 1,2%. Доминирующими факторами при анализе теплообмена можно считать скорость движения ших-

ты и теоретическую температуру фурменных газов. В этом случае сохранение $\frac{dt}{dh}$ на прежнем уровне достигается при выполнении следующего условия:

$$\frac{\Delta t_г}{t_г - t_ш} = \frac{\Delta w_ш}{w_ш}. \quad (4)$$

В результате моделирования влияния режимных параметров определены условия, при которых возможна форсировка работы доменных печей с использованием обогащения дутья кислородом при одновременном увеличении расхода природного газа и повышении горячей прочности кокса. Увеличение содержания кислорода в дутье при одновременном повышении расхода природного газа приводит к росту минутного выхода газа. При этом снижение удельного расхода кокса сопровождается снижением порозности коксовой насадки в зоне вязкопластичного состояния и зоне движения расплава в районе заплечиков.

В результате реализации комплекса мероприятий достигнута устойчивая работа доменных печей при содержании кислорода в дутье на уровне 30%. Основные показатели работы доменной печи в период освоения технологии работы с повышенным содержанием кислорода в дутье (до использования ПУТ) приводятся в таблице 2.

Таблица 2. Средние показатели работы доменных печей по годам

Показатели работы ДП	2007	2009	2010	2011	2012
Производительность, т/(м³·сут)	2,3	2,7	2,84	3,04	3,16
Расход кокса, кг/т	414	412	404,2	398,9	397,8
Расход природного газа, м³/т	115	117	125,2	131	131,7
Содержание O_2 в дутье, %	23,6	26,3	28,4	29,3	30,0
Теоретическая температура горения, °С	1947	1967	1995	2001	2020
Показатель горячей прочности кокса (сухого тушения), %	56,7	58,42	57,91	59,84	60,21

С 2009 года реализована технология выплавки чугуна с использованием железофлюса, который полностью исключил из шихты доменных печей известняк [1, 2, 10]. При производстве железофлюса полностью утилизируются аглоотсев, колошниковая и аспирационная пыли, а также конвертерные шламы [11]. Использование железофлюса сократило количество компонентов шихты, что повысило однородность химического состава рудной части шихты, но потребовало определения оптимального режима загрузки. Количество железофлюса в шихте определялось с учетом особенностей формирования столба шихтовых материалов при их загрузке бесконусным засыпным аппаратом [12]. При этом моделировалось формирование порции в бункере загрузочного устройства и ее истечение при использовании в шихте различной доли железофлюса. Рассматривалось распределение железофлюса при его расположении в нижней, средней и верхней частях бункера. Установлено, что наилучшее формирование поверхности засыпи достигается при доле железофлюса в железорудной части шихты 10–12% и расположении его в центре бункера (таблица 3).

Таблица 3. Равномерность распределения шихты при вариантах размещения железофлюса в бункере БЗУ

Вариант загрузки	Значения отклонений			
	σ_{Fe}	$\sigma_{осн.}$	σ_{FeO}	σ_{Mn}
1. ж/флюс в центре бункера БЗУ	1,774	0,559	1,108	0,081
2. ж/флюс в верху бункера БЗУ	2,544	0,809	1,399	0,099
3. ж/флюс в низу бункера БЗУ	4,340	1,206	1,569	0,127

Внедренный комплекс рекомендаций и мероприятий по совершенствованию загрузки шихты на доменных печах, оборудованных бесконусным загрузочным устройством, обеспечил снижение доли некондиционного чугуна по содержанию серы на 1,4% (абс.) и увеличение коэффициента извлечения ванадия на 1,12% (абс.).

Существенным фактором, обеспечившим снижение удельного расхода кокса, явилось внедрение технологии выплавки чугуна с использованием пылеугольного топлива [1, 13].

Вдувание в доменную печь пылеугольного топлива приводит к изменениям в работе печи и создает определенные проблемы и риски при ведении плавки [14]. Потенциальные проблемы и использованные способы их решения представлены в таблица 4.

Таблица 4. Потенциальные проблемы при использовании ПУТ

Проблема	Риски	Способ решения
Зависимость коэффициента замены от качества угля.	Похолодания или разогрев печи.	Корректировка расхода ПУТ на основе изучения переходных процессов.
Сжигание ПУТ в пределах фурменного очага	1. Гетерогенность конечного шлака при ограниченной скорости растворения зольной составляющей ПУТ в промежуточном шлаке. 2. Возможность запутывания несгоревших частиц углерода в шлаке.	1. Выбор углей на основе изучения кинетики их горения. 2. Ограничения расхода ПУТ в зависимости от качества угля. 3. Использование кислорода для обогащения дутья.
Изменение протяженности фурменного очага	Изменение конфигурации зоны вязкопластичного состояния.	Оптимизация загрузки шихты.
Изменение теоретической температуры горения	Изменение тепловых нагрузок на холодильники	Выбор оптимального соотношения расходов ПУТ, природного газа и кислорода.
Изменение соотношения рудной составляющей и кокса в шахте печи	Изменение газопроницаемости слоя шихты.	Оптимизация загрузки шихты.
Изменение количества газов	Изменение восстановления оксидов железа	Оптимизация гранулометрического состава шихты

При теоретическом анализе возникающих рисков установлено, что в качестве основного фактора, определяющего эффективность работы доменной печи с использованием пылеугольного топлива, следует рассматривать изменение газопроницаемости слоя в зоне вязкопластичного состояния. Учитывая, что ПУТ является углеводородной добавкой, выполнен анализ его влияния на удельный расход кокса и перепад давления в нижней зоне печи. При этом, принималось, что на один килограмм ПУТ в печь поступает 0,4–0,45 м^3 водорода, а на один килограмм углерода природного газа 3,75 м^3. Результаты расчета изменения нижнего перепада давления при разном отношении расхода ПУТ к расходу природного газа приводятся на рисунок 5 и 6.

Полученные зависимости показали, что при использовании ПУТ возможен выбор таких расходов ПУТ и природного газа, при которых достигается либо минимальный расход кокса, либо максимальная производительность печи. В настоящее время доменная печь № 5 работает с расходом ПУТ на уровне 60 кг/т, что, как видно из рис. 5 и 6, позволяет повысить ее производительность при одновременном снижении расхода суммарного топлива. В 2017 г. на доменной печи № 5 достигнута максимальная удельная производительность — 3,28 т/(м^3·сут).

Следует отметить, что при использовании ПУТ содержание титана в чугуне не повысилось (рисунок 7), что связано со снижением степени взаимодействия (время и удельное количество) расплава с углеродом коксовой насадки в области высоких температур.

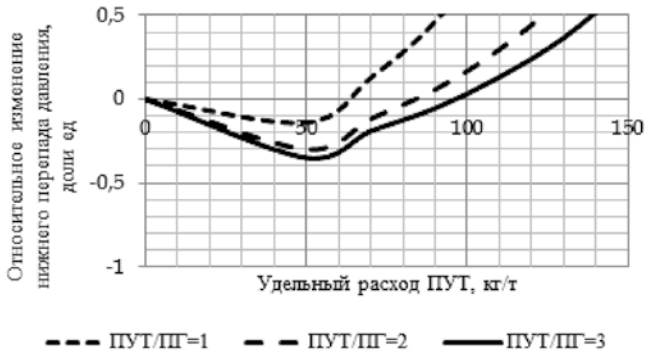


Рис. 6. Влияние удельного расхода ПУТ на изменение нижнего перепада давления

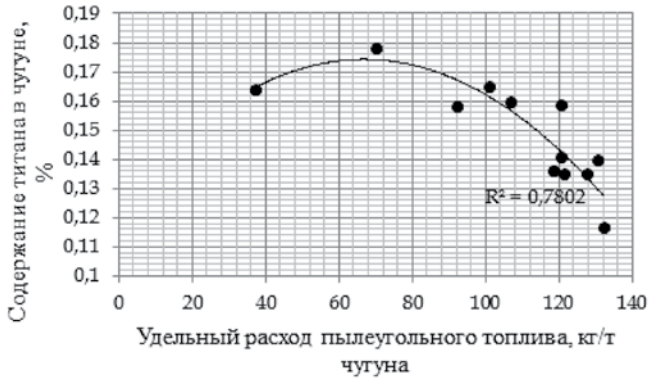


Рис. 7. Влияние удельного расхода ПУТ на содержание титана в чугуне

ВЫВОД

Современная технология переработки ванадийсодержащих титаномагнетитов в доменных печах АО «ЕВРАЗ НТМК» характеризуется удельной производительностью свыше 3,2 т/(м^3·сут) при расходе суммарного углерода топлива менее 415 кг/т. Высокоэффективная работа доменных печей при минимальном уровне восстановления титана достигается за счет:

— высокой интенсивности плавки;
— максимально возможного давления под колошником;
— высокой горячей прочности кокса;
— оптимизации загрузки шихты;
— оптимального использования пылеугольного топлива.

Список литературы

1. Филиппов В.В., Михалёв В.А., Миронов К.В. и др. Развитие теории и технологии выплавки ванадиевого чугуна с применением пылеугольного топлива // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 4. С. 22–25.
2. A.V. Kushnarev, V.V. Filippov, V.A. Mikhalev, B.S. Tleugabulov. System improvement of vanadium hot metal process at EVRAZ NTMK. // CIS Iron and Steel Review. Vol. 13 (2017), pp. 13–17.
3. Смирнов, Л.А. Металлургическая переработка ванадийсодержащих титаномагнетитов / Л.А. Смирнов, Ю.А. Дерябин, С.В. Шаврин. — Челябинск: Металлургия, 1990. — 256 с.
4. Гаврилюк, Г.Г. Доменная плавка титаномагнетитов / Г.Г. Гаврилюк, Ю.А. Леконцев, С.Д. Абрамов. — Тула: АССОД, 1997. — 216 с.

5. Носов С.К., Филиппов В.В., Шаврин С.В. Проблемы доменной плавки титаномагнетитов и пути их решения. — Сталь. 2003. №6. С.6–9.
6. Собянина О.Н., Филатов С.В., Загайнов С.А. Анализ особенностей восстановления титана в доменной печи // Сталь. 2012. № 3. С. 9–11.
7. Кушнарев А.В., Филатов С.В., Киричков А.А. и др. Внедрение технологии выплавки низкокремнистых чугунов на НТМК // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2011. № 3. С. 42–45.
8. Собянина О.Н., Филатов С.В., Загайнов С.А. Анализ условий движения расплава в горн доменной печи при плавке титаномагнетитов // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. № 4. С. 69–70.
9. Волков В.В., Филиппов В.В., Фролов В.В. и др. Освоение доменной плавки титаномагнетитовых руд с обогащением дутья кислородом. // В темат. отрасл. сб. «Металлургическая переработка комплексных железных руд», Свердловск, 1986, с. 7–13.
10. Загайнов С.А., Тлеугабулов Б.С., Кушнарев А.В.и др. Разработка технологии доменной плавки титаномагнетитов с использованием железофлюса // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2010. № 4. С. 13–18.
11. Темников В.В., Калимулина Е.Г., Тлеугабулов Б.С. Анализ образования и переработки металлургических отходов в АО «ЕВРАЗ НТМК» // Черные металлы. 2018. № 7. С. 32–37.
12. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А., Тлеугабулов Б.С. и др. Стабилизация состава продуктов доменной плавки титаномагнетитов при загрузке шихты БЗУ лоткового типа // Сталь. 2009. № 1. С. 16–19.
13. Миронов К.В., Михалёв В.А., Буньков А.А. и др. Опыт вдувания пылеугольного топлива при выплавке ванадиевого чугуна на ЕВРАЗ НТМК // Сталь. 2015. № 5. С. 17–19.
14. Филиппов В.В., Михалёв В.А., Миронов К.В. и др. Преимущества и риски технологии доменной плавки с использованием пылеугольного топлива // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 1. С. 38–42.

К.В. Миронов, АО «ЕВРАЗ НТМК»
Б.С. Тлеугабулов, Л.Ю. Гилева, В.А. Михалев,
УрФУ им. Б.Н. Ельцина

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАВКИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ

Тот факт, что используемые для анализа и прогноза режима работы доменных печей пересчетные коэффициенты зависят как от режима плавки, так и от конструкции печей, известен давно [1–4]. В то же время для определения влияния на показатели плавки тех или иных изменений в технологии, качестве сырья и топлива, а также в производственной деятельности используются данные более чем 30-летней давности. В основу этих данных положены результаты исследований по выполненным еще в 1984 г. разработкам ИЧМ и ЦНИИЧМ под руководством И.Г. Товаровского, касающимся изменений расхода кокса и производительности доменных печей под влиянием изменений параметров доменной плавки [5]. Но, как отмечено, технология доменной плавки за последние годы существенно изменилась, и использование подобных значений вносит значительные погрешности в результаты при выполнении различного рода анализов и прогнозов и искажает их достоверность. Это особенно касается доменного производства АО «ЕВРАЗ НТМК», где за последние 10 лет технология существенно изменилась.

В числе наиболее значимых мероприятий по совершенствованию технологии выплавки ванадиевого чугуна, реализованных в доменном цехе АО «ЕВРАЗ НТМК», можно выделить следующие:

— освоение технологии выплавки ванадиевого чугуна на реконструированных доменных печах в 2006–2007 г.г., включая разработку новых методов загрузки шихты при использовании бесконусного загрузочного устройства;
— планомерное снижение содержания кремния в чугуне (с 0,15–0,20 до 0,05–0,10 %) в 2006–2007 г.г.;

— освоение технологии плавки с использованием ванадийсодержащего железофлюса в 2009 г.;
— повышение содержания кислорода в дутье с 24 до 30 (и более) % в период 2010–2011 г.г.;
— освоение технологии использования пылеугольного топлива (ПУТ) совместно с природным газом в 2012–2013 г.г.

Для решения задачи уточнения коэффициентов в период с июня 2017 г. по апрель 2018 г. были выполнены исследования с использованием методов математического моделирования и статистического анализа среднесуточных и среднемесячных данных о работе доменных печей в период с 2013 года по июнь 2017 г.

Для математического моделирования использовалась математическая модель разработанная УрФУ им. Б.Н. Ельцина [6–8].

При расчете коэффициентов влияния с использованием модельного подхода учитываются физические явления, определяющие изменение показателей плавки. Расчет коэффициентов влияния факторов, оказывающих преимущественное влияние на тепловое состояние печи, выполнен по схеме, приведенной на рисунке 1; влияние факторов, оказывающих преимущественное влияние на газодинамику процесса — по схеме, представленной на рисунке 2.

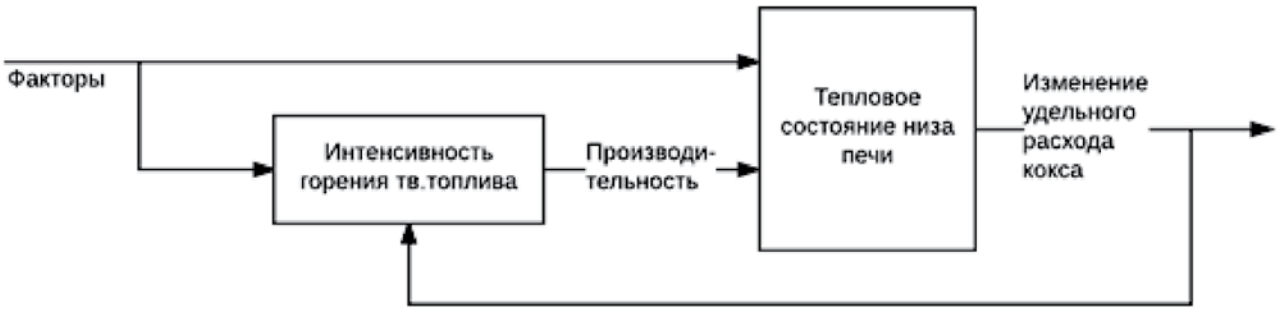


Рис. 1. Схема расчета коэффициентов влияния факторов, оказывающих преимущественное влияние на тепловое состояние печи

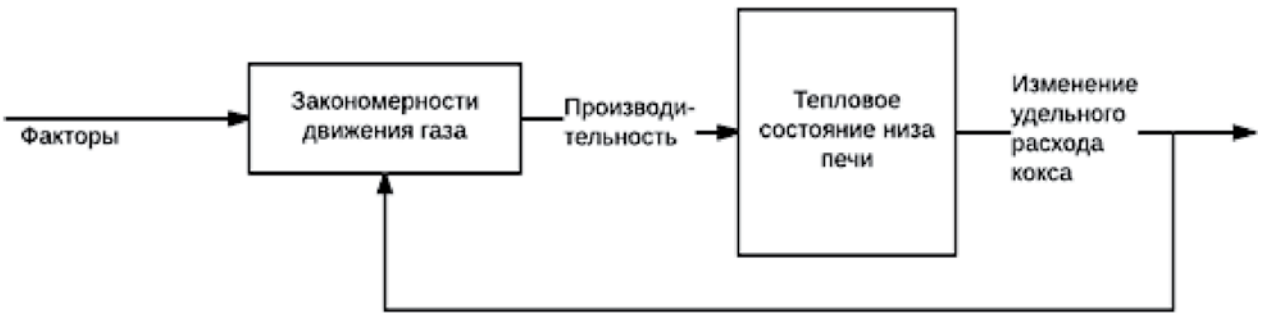


Рис. 2. Схема расчета коэффициентов влияния факторов, оказывающих преимущественное влияние на газодинамику процесса

Проверка адекватности разработанной модели осуществлялась путем сопоставления расчетных (при использовании математической модели) и фактических изменений показателей работы доменных печей (удельного расхода кокса и производительности печи) по усредненным данным за сутки и месяц. Рассмотрены показатели работы доменных печей № 5 и 6 за 2013–2017 годы. Показатели работы доменных печей месяцев с остановками на длительные ремонты были исключены. Результаты сопоставления приводятся на рисунках 3 и 4.

Результаты расчета коэффициентов подтвердили тот факт, что их значения существенно зависят от условий плавки (Таблицы 1–4).

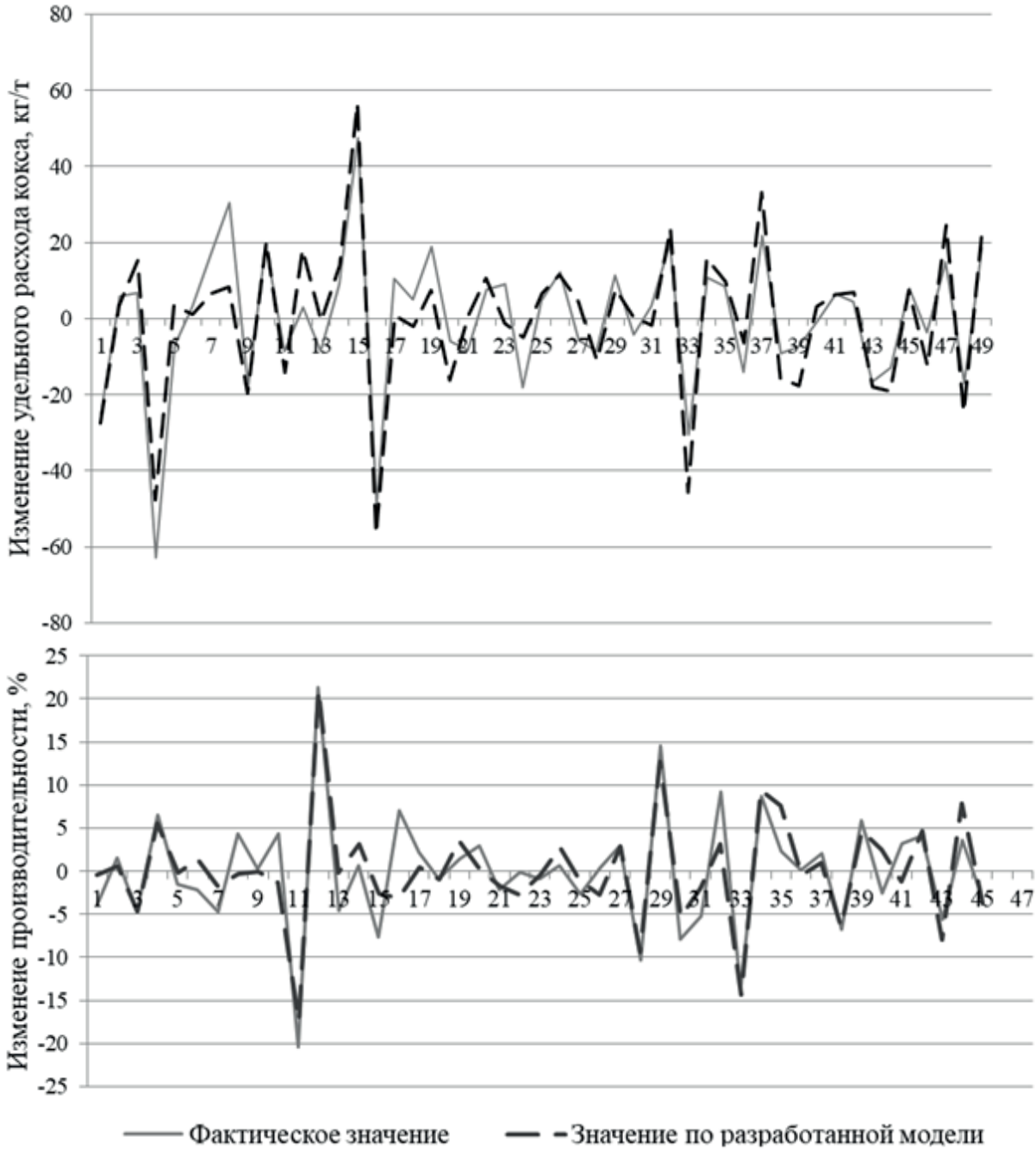


Рис. 3. Доменная печь № 5 (средние за месяц)

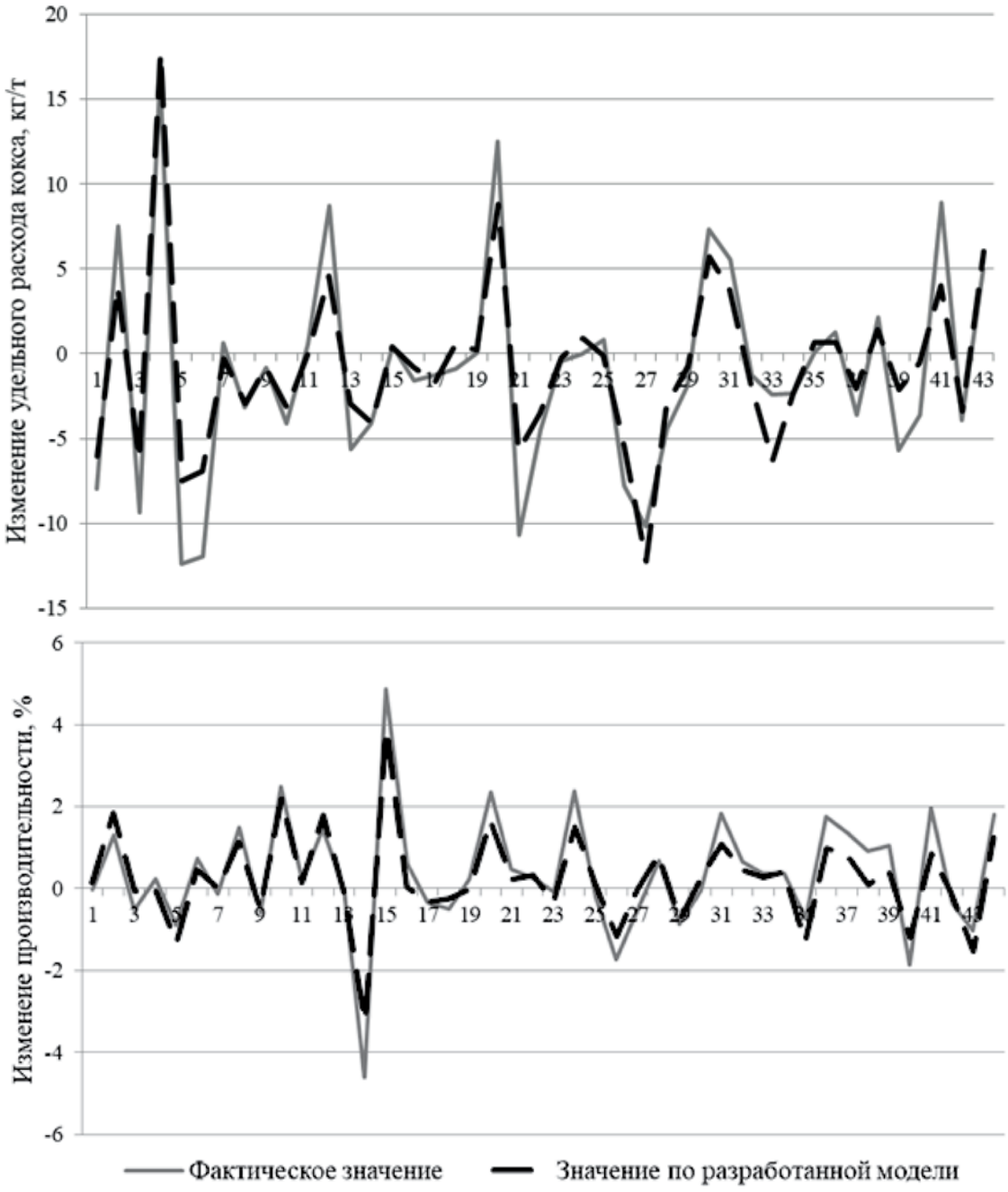


Рис. 4. Доменная печь № 6 (средние за сутки)

Таблица 1. Результаты расчета коэффициентов влияния режимных параметров на удельный расход кокса (ДП 6, 2013)

Факторы	Изменение Куд, кг/т				
	Ноябрь	Январь	Февраль	Март	Апрель
Температура дутья, +10 °С	–1,181	–1,179	–1,206	–1,317	–1,101
Влажность дутья, –1 г/м³	–0,483	–0,520	–0,518	–0,551	–0,494
Содержание кислорода в дутье, +1 %	–1,463	–1,067	–1,266	–1,622	–0,706
Расход природного газа, +1 м³/т	–0,823	–0,828	–0,829	–0,826	–0,831
Расход пылеугольного топлива, +1 кг/т	–0,975	–0,976	–0,978	–0,977	–0,978
Содержание кремния в чугуне, –0,1 %	–3,328	–3,299	–3,338	–3,382	–3,185

Таблица 2. Результаты расчета коэффициентов влияния режимных параметров на производительность печи (ДП 6, 2013)

Факторы	Изменение производительности печи, %				
	Ноябрь	Январь	Февраль	Март	Апрель
Температура дутья, +10 °С	0,466	0,438	0,449	0,502	0,414
Влажность дутья, –1 г/м³	0,076	0,076	0,079	0,093	0,074
Содержание кислорода в дутье, +1 %	3,820	3,621	3,675	4,001	3,349
Расход природного газа, +1 м³/т	–0,043	–0,040	–0,040	–0,042	–0,039
Расход пылеугольного топлива, +1 кг/т	–0,018	–0,017	–0,017	–0,018	–0,016
Содержание кремния в чугуне, –0,1 %	1,312	1,225	1,243	1,289	1,197

Таблица 3. Результаты расчета коэффициентов влияния режимных параметров на производительность печи (ДП 5, 2017)

Факторы	Изменение производительности печи, %					
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Температура дутья, +10 °С	0,478	0,762	0,439	1,123	0,755	0,396
Влажность дутья, –1 г/м³	0,082	0,115	0,063	0,125	0,129	0,038
Кислород в дутье, +1%	3,923	5,968	3,691	8,633	5,778	3,358
Расход природного газа, +1 м³/т	–0,039	–0,037	–0,040	–0,043	–0,035	–0,057
Расход ПУТ, +1 кг/т	–0,017	–0,016	–0,017	–0,018	–0,015	–0,021
Содержание [Si] в чугуне, –0,1%	1,216	1,164	1,277	1,342	1,132	1,412

Таблица 4. Результаты расчета коэффициентов влияния режимных параметров на удельный расход кокса (ДП 5, 2017)

Факторы	Изменение Куд, кг/т					
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Температура дутья, +10 °С	–1,283	–2,763	–1,181	–4,813	–2,575	–1,013
Влажность дутья, –1 г/м³	–0,491	–0,699	–0,475	–0,827	–0,689	–0,427
Кислород в дутье, +1 %	–2,076	–10,254	–1,469	–23,586	–8,759	–0,774
Расход природного газа, +1 м³/т	–0,823	–0,790	–0,818	–0,744	–0,809	–0,755
Расход ПУТ, +1 кг/т	–0,969	–0,956	–0,966	–0,934	–0,962	–0,956
Содержание [Si] в чугуне, –0,1%	–3,266	–4,223	–3,437	–5,751	–3,861	–3,618

Анализ влияния различных факторов на коэффициенты влияния показал, что абсолютные значения практически всех коэффициентов тем меньше, чем выше интенсивность плавки. Влияние интенсивности на коэффициент влияния температуры дутья на производительность печи и удельный расход кокса для доменных печей № 5 и 6 приводятся на рисунках 5 и 6.

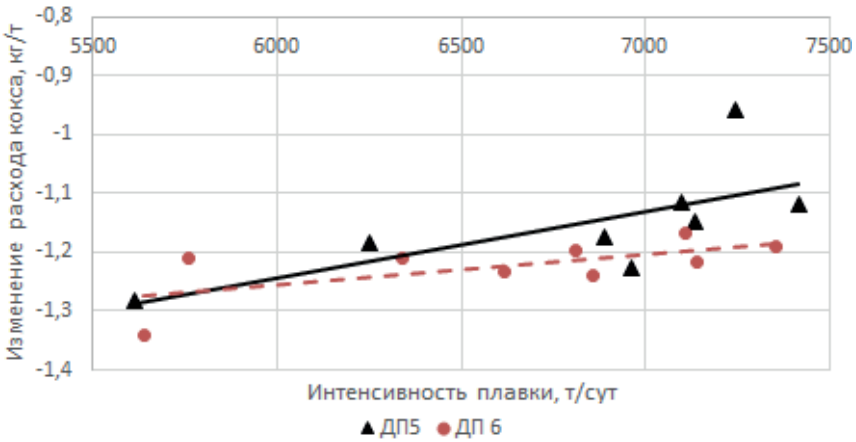


Рис. 5. Влияние интенсивности плавки на изменение расхода кокса при изменении температуры дутья на 10 °С (обобщенные суточные и месячные данные)

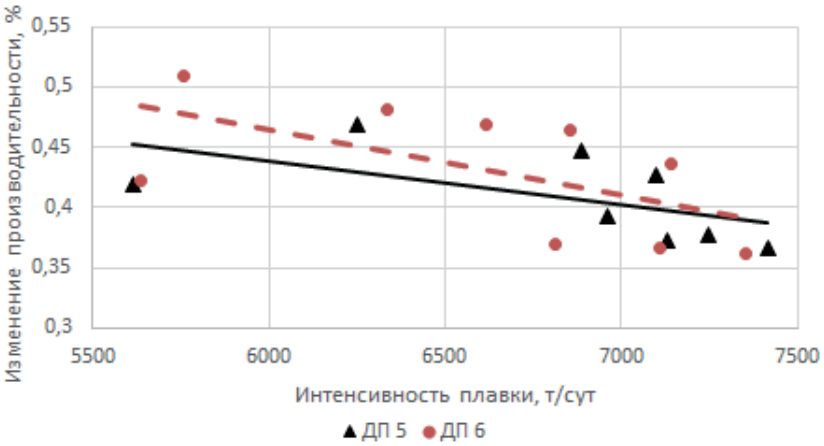


Рис. 6. Влияние интенсивности плавки на изменение производительности печей при изменении температуры дутья на 10 °С (обобщенные данные)

Выполнен анализ влияния продолжительности остановок печей, работы печей с пониженной производительностью на удельный расход кокса и производительность.

В результате выполненных исследований на основе математического моделирования и статистического анализа установлены значения 29 факторов влияния на производительность доменных печей и эквивалентный расход кокса. Ранее учитывалось 23 фактора. При этом, значения всех коэффициентов дифференцированы для работы печей с различной интенсивностью.

Список литературы

1. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. М.: Металлургия,1980. 304 с.
2. Курунов И.Ф., Доброскок В.А., Макиенко В.Г. Влияние размеров доменной печи и темпа выпусков на динамические характеристики // Известия вузов. Черная металлургия. — 1975. — № 5. — С. 36–38.
3. Товаровский И.Г., Лялюк В.П., Эволюция доменной плавки, — Днепропетровск: Пороги, 2001. — 424 с.
4. Суханов Е.Л., Загайнов С.А., Раев Ю.О. / Определение методом моделирования показателей доменного процесса при изменении условий плавки Известия Вузов,черная металлургия, 1989, № 8 , с. 129–133.
5. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Монография. 2-е изд. Днепропетровск : Пороги, 2009. 768 с.
6. Гилева Л. Ю. Ярошенко Ю.Г., Загайнов С.А. Разработка математической модели с переменной структурой для анализа и прогноза показателей работы доменной печи на основе отчетных данных // Известия вузов, Черная металлургия, № 4, 1993.
7. Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов, В.А. Краснобаев, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, В.С. Швыдукий, С.А. Загайнов, О.П. Онорин; Информационные системы в металлургии. Под ред Н.А. Спирина. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет, 2001. 617 с.
8. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / под ред. Н.А. Спирина — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. — 301 с.

С.К. Сибагатуллин, А.С. Харченко,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
А.А. Полинов, Д.И. Селезнев, М.А. Семенюк, ПАО «ММК»

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОСТУПЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ШИХТЫ ПО КРУПНОСТИ ИЗ БУНКЕРА БЗУ В КОЛОШНИКОВОЕ ПРОСТРАНСТВО ПЕЧИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ЗАГРУЗКИ

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для работы доменной печи с высокой производительностью и низким удельным расходом кокса необходимо обеспечивать равномерное распределение материалов [1–4] и газов [5–9] по окружности печи и оптимальное размещение шихты по радиусу колошника [10]. Бесконусным загрузочным устройством лоткового типа (БЗУ ЛТ) сложно обеспечить равномерное распределение шихты по окружности по разным причинам [11–15]. Одной из них является многокомпонентность загружаемой шихты [16, 17]. Например, на ПАО «ММК» помимо железорудных материалов (агломерат и окатыши) в ее составе присутствуют коксовый орешек или фракция, кварцит, промывочные материалы, такие как железная или марганцевая руды, конвертерный шлак, материалы, формирующие гарнисаж, например, титаномагнетитовая руда, шунгит [18, 19]. Кроме того, материалы поступают в доменную печь неоднородные по крупности и различные по качеству [20, 21]. Это обуславливает различную траекторию движения компонентов шихты от лотка до поверхности ранее сформировавшегося слоя [22], вследствие чего происходит неравномерное протекание процессов восстановления и плавления по окружности печи [23–25]. В связи с этими явлениями необходимо выявить закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи с целью разработки рациональных режимов загрузки железорудных материалов в доменную печь компактным БЗУ ЛТ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На лабораторной установке однотрактового компактного загрузочного устройства лоткового типа, изготовленной в масштабе 1:5 по отношению к линейным размерам БЗУ доменных печей № 4 и 6 ПАО «ММК» [2], было проведено несколько серий экспериментов.

В первой серии экспериментов исследовали следующие факторы:

— определение доли фракции 1–5 мм в агломерате при одновременном изменении соотношения агломерата крупностью более и менее 10 мм;
— расположение фракции агломерата крупностью более 10 мм в слое агломерата фракции крупностью менее 10 мм;
— расположение фракции агломерата крупностью менее 10 мм в слое агломерата фракции крупностью более 10 мм;

В качестве выходного параметра использовали показатель равномерности поступления агломерата из бункера БЗУ лоткового типа в колошниковое пространство (ККШ), рассчитанный по формуле:

$$K_{\text{кш}} = 1 - \frac{\sigma_i}{\text{КШ}_{\text{ср}}}, \quad (1)$$

где σ_i — среднеквадратическое отклонение по массе *i*-тых порций компонентов шихты, поступающих из бункера;

$\text{КШ}_{\text{ср}}$ — среднее значение поступающих из бункера порций шихты по массе.

В процессе эксперимента в бункер БЗУ загружали агломерат фракцией 1–5 мм в смеси с агломератом крупностью (–10) мм, которую располагали под фракцией +10 мм, над ней и в среднем ее слое. Также фракцию +10 мм размещали в слое агломерата крупностью (–10) мм. При этом соотношение фракций +10 и (–10) мм составляло 90:10; 70:30; 50:50; 30:70; 10:90. Долю фракции 1–5 мм изменяли в интервале от 1 до 18%. При угле открытия шихтового затвора 50° производили выпуск материала. По ходу выпуска отбирали пробы, рассеивали агломерат на классы: 1–3; 3–5; 5–8; 8–10; 10–12; 12–15; 15–17,5; 17,5–25; >25. Определяли долю агломерата крупностью 1–5, (–10), +10 мм по ходу выпуска и затем по формуле 1 рассчитывали показатель равномерности поступления агломерата каждой фракции из бункера БЗУ.

Размещение агломерата фракции 1–5 мм в количестве 5,5% от его расхода в смеси с агломератом фракции (–10) мм под агломератом крупностью +10 мм при средневзвешенной крупности всего агломерата 12,2 мм сопровождалось поступлением максимального количества класса 1–5 мм в начале выпуска (рис. 1). В порциях, сформированных в период от 10 до 30% времени от общей продолжительности выпуска, эквивалентная по поверхности крупность агломерата была ниже средней исходной ее величины (рис. 2 А — соотношение крупности менее единицы). По истечении 40% времени от общей продолжительности выпуска содержание фракции 1–5 мм в формируемых по ходу выпуска порциях уменьшалось в соответствии с выражением 2 (R^2 = 0,99). Крупность поступающего из бункера агломерата превышала исходную среднюю ее величину (соотношение крупности более единицы). Средняя величина показателя равномерности поступления фракции 1–5 мм составила 0,71.

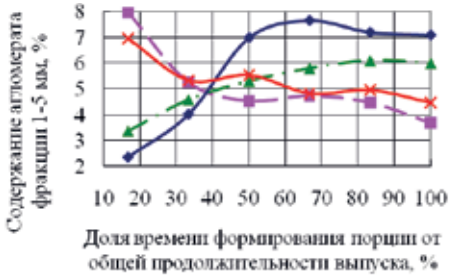


Рис. 1. Содержание агломерата фракции 1–5 мм по мере истечения материала из бункера БЗУ при загрузке фракции 1–5 мм совместно с агломератом крупностью (–10) мм в бункер под фракцию +10 мм (·-■-·), над ней (—◆—), в средний ее слой (· -▲- ·) и расположении фракции +10 мм в слое агломерата крупностью (-10) мм (><)

$$A^{п}_{1-5} = 5,7 - 0,67 \cdot e^{\tau_{фп}} - \frac{0,05\ln(\tau_{фп})}{\tau^2_{фп}}, \quad (2)$$

где: $A^{п}_{1-5}$ — содержание агломерата фракции 1–5 мм по ходу выпуска при загрузке его под фракцией +10 мм;

$\tau_{фп}$ — доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0–1.

При загрузке фракции 1–5 мм в составе агломерата крупностью (–10) мм после класса +10 мм в начале выпуска наблюдали минимальное содержание фракции 1–5 мм с последующим увеличением ее количества в порциях, формируемых по ходу выпуска согласно уравнению 3 (R^2 = 0,99). Средняя величина показателя равномерности поступления фракции 1–5 мм составила 0,63.

$$A^{н}_{1-5} = \tau^{1,88}_{фп} e^{-4,21-2,52\cdot10^{-2}\tau_{фп}}, \quad (3)$$

где: $A^{н}_{1-5}$ — содержание агломерата фракции 1–5 мм по ходу выпуска при загрузке его над фракцией +10 мм;

$\tau_{фп}$ — доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0–100%.

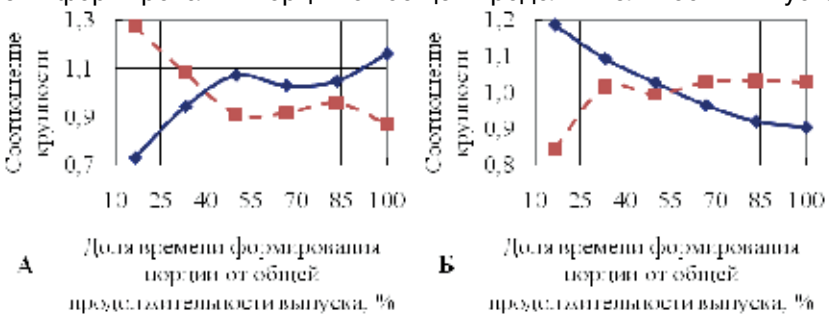


Рис. 2. Изменение отношения эквивалентной по поверхности крупности агломерата по мере истечения его из бункера БЗУ к исходной ее величине, при загрузке фракции 1–5 мм в бункере под фракцией +10 мм (—◆—, рис. А), над ней (·-■-·, рис. А), в средний ее слой (—◆—, рис. Б) и расположении фракции +10 мм в слое агломерата крупностью (-10) мм (·-■-·, рис. Б)

Загрузка агломерата крупностью 1–5 мм в смеси с агломератом класса (–10 мм) в середину слоя фракции +10 мм обеспечивала величину показателя равномерности поступления агломерата класса 1–5 мм, равную 0,80. Характер изменения отношения эквивалентной по поверхности крупности агломерата по мере истечения его из бункера БЗУ к исходной ее величине незначительно отличался от такового при загрузке мелкого агломерата над слоем крупного (сравнение рисунков 2А и 2Б). В начале выпуска поступали крупные частицы агломерата. По ходу выпуска крупность шихты уменьшалась и в последней порции отношение эквивалентной по поверхности крупности к исходной величине составляла 0,9. Максимальную величину показателя равномерности поступления агломерата крупностью 1–5 мм равного 0,84 добились путем загрузки агломерата класса +10 между фракцией (–10) мм. Изменение эквивалентной по поверхности крупности агломерата по ходу выпуска было следующим: вначале поступали мелкие частицы шихты, после истечения 33,3% времени от общей продолжительности выпуска наблюдали среднюю ее величину (рис. 2 Б). Распределение агломерата фракции 1–5 мм по ходу выпуска при расположении мелкого агломерата в слое крупного и при размещении фракции +10 мм в слое агломерата (–10 мм) описывают соответственно уравнения 4 и 5.

$$A^{c}_{1-5} = 7,8 + 8,3\tau^2_{фп} \cdot \ln(\tau_{фп}) - \frac{0,689}{\tau_{фп}}, R^2 = 0,98 \quad (4)$$

где: A^{c}_{1-5} — содержание агломерата фракции 1–5 мм по ходу выпуска при загрузке его в середину слоя фракции +10 мм;

$\tau_{фп}$ — доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0–1.

$$A^{нп}_{1-5} = 5,5 - 2,21\cdot10^{-5}\tau^2_{фп}\ln(\tau_{фп}) + 3,53\cdot10^{7}e^{-\tau_{фп}}, R^2 = 0,93 \quad (5)$$

где: $A^{нп}_{1-5}$ — содержание агломерата фракции 1–5 мм по ходу выпуска при загрузке фракции +10 мм в середину слоя класса (–10) мм;

$\tau_{фп}$ — доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0–100%.

Таким образом, можно сделать вывод, что для уменьшения содержания мелких фракций в осевой зоне доменной печи необходимо координировать последовательность загрузки компонентов шихты и направление движения углового положения лотка. При загрузке материала меньшей крупностью в нижнюю часть бункера БЗУ целесообразно производить выпуск в направлении движения лотка от периферии к центру. В условиях размещения материала меньшей крупностью в слое более крупного материала или над ним целесообразно изменение направления движения лотка от осевой зоны к периферии.

Увеличение содержания фракции 1–5 мм в агломерате в интервале от 1 до 10% при одновременном росте фракции (–10) мм от 10 до 90% за счет снижения доли агломерата крупностью +10 мм не значительно влияло на перераспределение агломерата фракции 1–5 мм в сформированных по ходу выпуска порциях (рисунок 3). Средняя величина показателя равномерности составляет 0,88. Увеличение содержания фракции 1–5 мм от 10 до 18% значительно ухудшало равномерность ее поступления из бункера в колошниковое пространство печи. В первых порциях содержание мелочи составляло в среднем 10%, а по истечении 60% времени выпуска материала от общей его продолжительности — 25%. Показатель равномерности снизился от 0,88 до 0,62. В связи с этим превышение содержания фракции 1–5 мм границы в 10% будет отрицательно сказываться на газодинамике доменного процесса в отдельных секторах печи и, следовательно, сопровождаться ухудшением технико-экономических показателей.

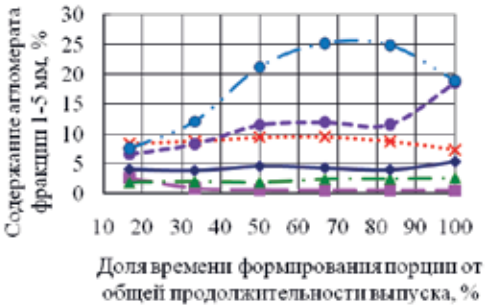


Рис. 3. Содержание агломерата фракции 1–5 мм по мере истечения из бункера БЗУ при доле ее в агломерате, %: 1 (·-■-·), 2,5 (·-▲-·), 4,5 (-◆-), 9 (-><-), 11,5 (·-◆-·) и 18% (·--●--·)

Показатель равномерности агломерата всех фракций можно описать уравнениями 6 и 7:

$$K_{A1} = 0{,}792 + 0{,}047A_{A>10} - 0{,}095A_{A>10}A_{(-10)} - 0{,}338A^2_{A>10} - 0{,}047A^2_{(-10)}, \quad (6)$$

где: $A_{A>10}$ — содержание агломерата фракции +10 мм, располагающегося под агломератом фракции (–10) мм (0–100),%;

$A_{(-10)}$ — содержание агломерата фракции –10 мм от его общего количества (10–90),%.

$$K_{A2} = 0{,}757 - 0{,}047A_{A<10} - 0{,}021A_{(-10)} - 0{,}095A_{A>10}A_{(-10)} - 0{,}301A^2_{A<10} - 0{,}051A^2_{(-10)}, \quad (7)$$

где: $A_{A<10}$ — содержание агломерата фракции (–10) мм, располагающегося под агломератом фракции +10 мм (0–100),%;

$A_{(-10)}$ — содержание агломерата фракции –10 мм от его общего количества (10–90), %;

По критерию Фишера произвели проверку адекватности моделей и убедились в том, что уравнение соответствует экспериментальным данным. Коэффициенты детерминации R^2 равные, соответственно, 0,98 и 0,99 показывают, что построенная регрессия объясняет более 98% разброса значений переменной КА относительно среднего.

При содержании в шихте агломерата фракции +10 мм 90% и класса (–10) мм 10% в условиях размещения их в бункере БЗУ в следующей последовательности: на дно бункера БЗУ крупный агломерат,

затем мелкий, обеспечивало величину показателя равномерности равную 0,68 (рисунок 4 А). Загрузка в нижнюю часть бункера БЗУ мелкого агломерата с долей 0,1, после чего крупного с долей 0,9, понижала величину показателя равномерности от 0,68 до 0,21. Уменьшение содержания агломерата крупностью +10 мм в шихте от 90 до 10% за счет увеличения фракции (–10) мм от 10 до 90% при размещении в бункере БЗУ фракции +10 мм над фракцией (–10) мм сопровождалось ростом показателя равномерности от 0,21 до 0,73. В условиях расположения фракции +10 мм под фракцией (–10) мм величина показателя равномерности уменьшалась от 0,68 до 0,14.

Из этого следует, что показатель равномерности поступления агломерата имеет более высокую величину равную 0,21 против 0,14 при расположении агломерата крупных классов над мелкой фракцией по сравнению с режимом загрузки, предполагающим размещение в нижней части бункера крупного агломерата, после чего — фракции (–10) мм. Это является результатом более быстрого перемещения крупного агломерата к выпускному отверстию, по сравнению с агломератом класса (–10) мм при загрузке каждого из них в бункер последним. Анализ закономерностей поступления фракций агломерата по ходу выпуска показал, что в первых двух порциях, сформированных по истечении 33,3% времени после начала выпуска, содержание агломерата крупностью +10 мм превышало содержание агломерата класса (–10) мм на 11,6% отн. Крупные частицы агломерата имеют меньшее число взаимных контактов по сравнению с мелкими, вследствие чего имеют меньшую величину внутреннего и внешнего трения. Наряду с увеличенной массой отдельных частиц это позволяет быстрее перемещаться им в разрыхленном слое шихты, тем самым улучшая равномерность поступления агломерата в целом.

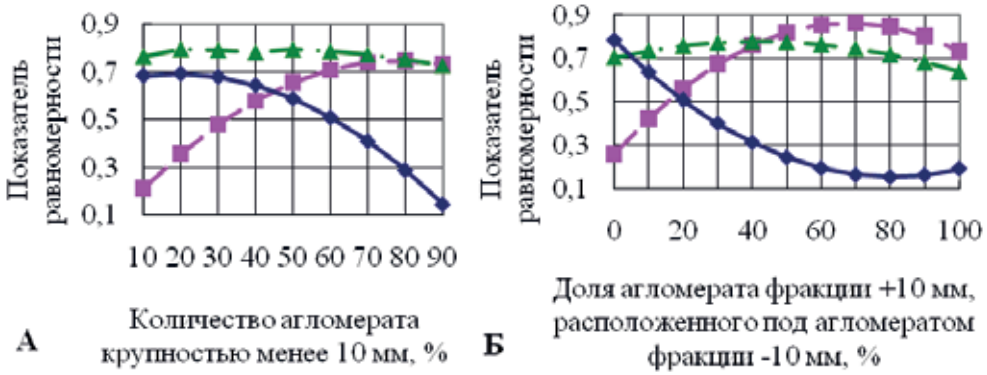


Рис. 4. Зависимость равномерности поступления агломерата из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи от различных факторов: А — доли фракции (–10) мм при расположении ее в среднем слое фракции +10 мм (·-▲-·) под ней (·-■-·), на ней (—◆—); Б — доли фракции +10 мм расположенной под фракцией (-10) мм при содержании в шихте последней: 10% (·-■-·), 50% (·-▲-·) и 90% (—◆—)

Согласно рис. 4, для анализируемых режимов загрузки целесообразно в нижней части бункера располагать материал с подавляющим содержанием его в составе шихты, а поверх него — материал с минимальным расходом. Более высокий показатель равномерности равный 0,81 наблюдали при расположении 10% фракции (–10) мм между порциями агломерата крупностью +10 мм равными 70 и 30% соответственно расположенными под и над агломератом мелких классов (рисунок 4 Б). Увеличение доли агломерата крупностью (–10) мм от 10 до 50% смещало экстремум в направлении уменьшения доли агломерата класса +10 мм, располагающегося под агломератом крупностью (–10) мм от 70 до 50%. Наиболее высокую величину показателя равномерности наблюдали при размещении агломерата фракции +10 мм в слое класса (–10) мм согласно рис. 5 А.

Из рисунка 5 Б следует, что при равных долях крупной и мелкой фракций в составе шихты размещение агломерата крупности +10 мм в слое класса (–10) мм обеспечивало максимальную величину показателя равномерности равную 0,79 против 0,73 в условиях расположения фракции (–10) мм в слое +10 мм.

Таким образом, можно сделать вывод, что для обеспечения равномерного распределения железорудного сырья по крупности в процессе выпуска его из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи с целью достижения рационального распределения газового потока через слой шихты по окружности

целесообразно материал с более высокой эквивалентной по поверхности крупностью располагать в слое материала с меньшей крупностью. В железорудной части шихты, загружаемой в доменные печи ПАО «ММК», наиболее высокую эквивалентную по поверхности крупность имеют добавочные материалы. А именно: ее величина для окатышей составляет в среднем 12 мм, для коксового орешка — 18 мм, а для коксовой фракции и промывочных материалов превышает 30 мм, в то время как для агломерата она составляет 10 мм.

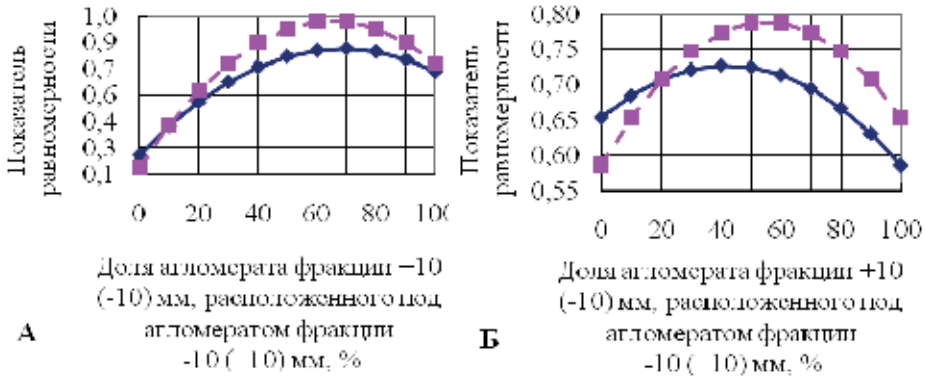


Рис. 5. Зависимость равномерности поступления агломерата из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи от доли фракции +10 (–10) мм, расположенной соответственно под фракцией (–10) мм (—◆—), +10 (·-■-·) при содержании агломерата соответствующей крупности перемещаемой в слое другой фракции, равной, 10 (А) и 50% (Б)

В связи с этим во второй серии экспериментов исследовали влияние последовательности загрузки компонентов шихты на показатель равномерности по крупности материалов ($P_к$) в процессе поступления их из бункера БЗУ на лоток, рассчитанный по формуле 8 [26]. Для этого окатыши загружали в нижнюю часть бункера БЗУ под агломератом, над ним и в слое между порциями агломерата в различных вариантах: 25:75; 50:50 и 75:25%, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами. Сравнили их с режимами загрузки агломерата в слой окатышей в различных вариантах: 25:75; 50:50 и 75:25%, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над агломератом. Долю окатышей меняли от 0,1 до 0,9 с шагом 0,2.

$$P_к = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{f_{экв}}{f_{срв}}\right)_i - \sigma\left(\frac{f_{экв}}{f_{срв}}\right)_i \qquad (8)$$

где: $P_к$ — показатель равномерности по крупности компонентов шихты в процессе поступления их из бункера БЗУ на лоток;

σ_i — среднеквадратическое отклонение однородности *i*-тых порций шихты ($f_{экв}/f_{срв}$) по крупности, поступающих из бункера;

$f_{экв}$, $f_{срв}$ — значение эквивалентной по поверхности и средневзвешенной крупности порций шихты, поступающих из бункера;

n — число порций.

В результате установили зависимость величины показателя равномерности по крупности материалов от различных условий загрузки (R^2=0,99):

$$P_{к\ (ЖРС)} = 0{,}959 + 0{,}159\ A_{доб} + 0{,}22\ln(Д_{ОК}) - 0{,}383\,A^2_{доб} + 0{,}096\cdot[\ln(Д_{ОК})]^2 - 0{,}264\ A_{доб}\ln(Д_{ОК}) + \\ +0{,}182\,A^3_{доб} + 0{,}016[\ln(Д_{ОК})]^3 - 0{,}043\,A_{доб}\,[\ln(Д_{ОК})]^2 + 0{,}133\,A^2_{доб}\ \ln(Д_{ОК}) \qquad (9)$$

где: $A_{ДОБ}$ — доля агломерата, располагающегося под добавочными материалами в шихтовом бункере БЗУ, (0–1);

$Д_{ОК}$ — доля окатышей в шихте (0,1–0,9) от расхода железорудного сырья.

Анализ результатов исследований при доле окатышей от железорудной части шихты в пределах 0,25–0,45, что соответствует средним изменениям для условий ПАО «ММК», показывает следующее:

наиболее низкий показатель равномерности по крупности железорудных материалов наблюдали при расположении окатышей в нижней части бункера БЗУ под агломератом. Такой режим загрузки компонентов шихты с долей окатышей в ней 0,38 обеспечивает поступление вначале выпуска крупных частичек (рис. 6 А). По ходу выпуска крупность поступающего на лоток материала уменьшалась. Коэффициент вариации соотношения крупности по ходу выпуска в данном случае имел максимальную величину равную 13,4 (таблица 1), что обеспечивало минимальную величину показателя Рк (ЖРС) равную 0,82 (таблица 1). Загрузка окатышей в середину слоя агломерата между порциями, сформированными из него, в количестве 25 и 75% от массы агломерата, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами, а также после агломерата, давали схожие результаты. Соотношение крупности по ходу выпуска изменялось незначительно. В начале выпуска наблюдали более высокое содержание мелочи (рис. 6 Б), после чего поступали средние по крупности частицы компонентов шихты. Минимальные колебания изменения соотношения эквивалентной по поверхности крупности по ходу выпуска обеспечивало размещение окатышей в середине слоя агломерата (таблица 1).

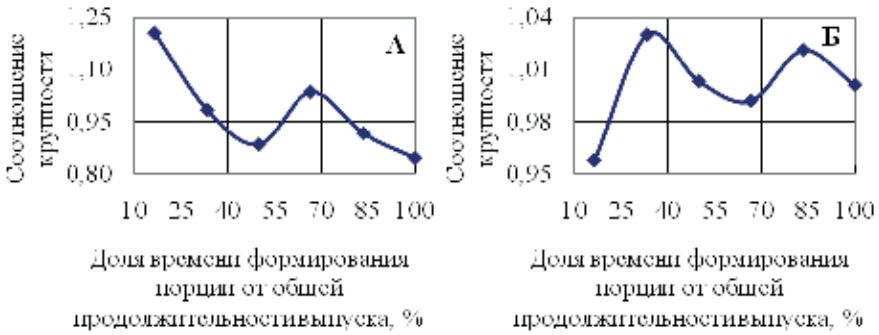


Рис. 6. Изменение отношения эквивалентной по поверхности крупности железорудных материалов по мере истечения их из бункера БЗУ к исходной ее величине при загрузке окатышей в бункере под агломератом (рисунок А), в среднем его слое (рисунок Б)

Таблица 1. Изменение показателей равномерности по крупности железорудных материалов по ходу выпуска при различной последовательности загрузки компонентов шихты и доле окатышей равной 0,38 от расхода ЖРС

Доля агломерата, располагающегося под окатышами в бункере БЗУ,%	Показатель равномерности по крупности материалов в процессе поступления их из бункера БЗУ на лоток, рассчитанный по формуле 8 ($Р_{к\ (ЖРС)}$)	Коэффициент вариации соотношения эквивалентной по поверхности крупности по ходу выпуска
0	0,82	13,4
25	0,89	2,6
50	0,90	2,5
75	0,89	4,6
100	0,87	4,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи для различных условий загрузки, позволяющие равномерно распределять материалы по окружности печи. Разработаны математические зависимости очередности и равномерности поступления железорудных материалов по крупности из шихтового бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при различных режимах загрузки.

При загрузке материалов в бункер БЗУ для обеспечения более высокого показателя равномерности целесообразно в нижней части бункера располагать материал, расход которого наиболее высокий, а поверх него — наиболее низкий.

Для обеспечения равномерного распределения железорудного сырья по крупности в процессе выпуска его из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи с целью достижения рационального распределения газового потока через слой шихты по окружности целесообразно материал с более высокой эквивалентной по поверхности крупностью располагать в слое материала с меньшей крупностью. Наиболее высокую равномерность поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ обеспечивает загрузка окатышей в середину слоя агломерата. При доле окатышей 38% от расхода железорудной части шихты величина показателя равномерности составила 0,90.

Список литературы

1. Тонких Д.А., Кариков С.А., Тараканов А.К. и др. Совершенствование режимов загрузки и дутья на доменных печах ПАО МК «АЗОВСТАЛЬ». Металлург. 2013. № 9. С. 42–48.
2. 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.
3. Пыхтеева К.Б., Загайнов С.А., Тлеугабулов Б.С., Филиппов В.В., Журавлев Д.Л., Николаев Ф.П. Анализ особенностей формирования порций и истечения материалов из бункера БЗУ при загрузке шихты // Сталь. 2008. № 6. С. 14–19.
4. Воронцов В.В., Степанов А.Т. К вопросу о распределении шихтовых материалов по окружности колошника доменной печи / Вестник Череповецкого государственного университета. 2010. № 1. С. 129–133.
5. Андронов В.Н., Белов Ю.А. / Оценка эффективности распределения дутья и природного газа по фурмам // Сталь. № 9. 2002. С. 15–17.
6. Лялюк В.П., Тараканов А.К., Кассим Д.А., Ризницкий И.Г. Повышение равномерности распределения дутья по окружности горна доменной печи. Металлург. 2018. № 2. С. 30–34.
7. Сибагатуллин С.К., Харченко А.С. Полинов А.А. и др. Стабилизация соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи. Теория и технология металлургического производства. 2014. № 1 (14) С. 23–25.
8. Сибагатуллин С.К., Харченко А.С., Чернов В.П., Бегинюк В.А. Совершенствование доменного процесса за счет создания условий для увеличения потребления природного газа применением сырья повышенной прочности. Черные металлы. 2017. № 8. С. 27–33.
9. Дружков В.Г., Ширшов М.Ю. Совершенствование узла подвода горячего дутья в кольцевой воздухопровод доменной печи. Металлург. 2016. № 12. С. 39–42.
10. Товаровский И. Г. Прогнозная оценка влияния шихтовых материалов по радиусу колошника на процессы и показатели доменной плавки // Металлург. 2014. № 8. С. 46–52.
11. Харченко А.С., Сибагатуллин С.К., Гущенко Д.Н., Теплых Е.О. Влияние различных факторов на равномерность распределения коксового орешка в колошниковом пространстве доменной печи, оснащенной БЗУ лоткового типа. Теория и технология металлургического производства. 2010. № 1. С. 33–38.
12. Zhao Huatao, Zhu Minghua, Du Ping. Uneven distribution of burden materials at blast furnace top with parallel bunkers. ISIJ International 2012. Vol. 52. No. 12. PP. 2177–2185.
13. Kaoru Nakano, Kohei Sunahara, Takanobu Inada. Advanced Supporting System for Burden Distribution Control at Blast Furnace Top. ISIJ International. 2010. Vol. 50. No. 7. PP. 994–999.
14. Zhao-jie Teng, Shu-sen Cheng, Peng-yu Du, Xi-bin Guo. Mathematical model of burden distribution for the bell-less top of a blast furnace. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. 2013, Volume 20, Issue 7, pp. 620–626.
15. Сибагатуллин С.К., Савинов А.С., Харченко А.С., Девятченко Л.Д. Выявление источников неравномерного распределения компонентов железорудной шихты, загружаемой в доменную печь. Черная металлургия. 2017. № 12 (1416). С. 30–36.
16. Сибагатуллин С.К., Теплых Е.О., Харченко А.С., Махмутов Р.Ф., Семенюк М.А., Бегинюк В.А. Зависимость равномерности поступления агломерата и окатышей в колошниковое пространство печи

от последовательности размещения их в бункере БЗУ Теория и технология металлургического производства. 2012. № 12. С. 16–21.
17. Sibagatullin, S.K., Kharchenko, A.S., Logachev, G.N. 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 С. 531–537.
18. Полинов А.А., Павлов А.В., Логачёв Г.Н., Онорин О.П., Спирин Н.А. Влияние расхода конвертерного шлака на показатели работы доменных печей. Металлург. 2017. № 4. С. 41–47.
19. Павлов А.В., Онорин О.П., Спирин Н.А., Полинов А.А. Работа доменных печей ОАО «ММК» с высокой долей окатышей в шихте. Часть 1 Металлург. 2016. № 6. С. 36–42.
20. Семенов Ю.С. Выбор рациональных режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, для условий работы с малой массой подачи и с нестабильным качеством шихтовых материалов. Черная металлургия 2013. № 12. С. 14–19.
21. Сибагатуллин С.К., Харченко А.С., Теплых Е.О., Степанов Е.Н., Мезин Д.А., Фетисов В.Б. Прочностные характеристики коксового орешка различного происхождения. Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 1. С. 19–21.
22. Предпусковые исследования загрузки и распределения шихты в доменной печи большого объема / Большаков В.И., Богачев Ю.А. Вишняков В.И. и др. // Черная металлургия. Бюл. НТЭИ. 2008. № 6. С. 14–19.
23. Mousa E., Senk D., Babich A. Reduction of Pellets-Nut Coke Mixture under Simulating Blast Furnace Conditions / Steel Research International. — 2010. Vol. 81. Issue 9. — P. 706–715.
24. Mousa E., Senk D., Babich A. Einfluss von Brechkoks auf das Reduktionsverhalten von Eisenerzsinter / *Tagungsband zum 24. Aachener Stahlkolloquium Metallurgie*, «Rohstoffe-Werkstoffe-Gesellschaft», 17–18.09.2009, Aachen. — Aachen: Mainz, 2009. — P. 67–77.
25. S. Watakabe, K. Takeda, H. Nishimura, S. Goto, N. Nishimura, T. Uchida, M. Kiguchi // ISIJ International. 2006. Issue 4. P. 513–522.
26. Сибагатуллин С.К., Харченко А.С., Бегинюк В.А., Харченко Е.О., Сибагатуллина М.И., Миникаев С.Р., Савченко Г.Ю. Действие различных факторов на равномерность поступления шихтовых материалов по крупности из бункера БЗУ лоткового типа. Теория и технология металлургического производства. 2016. № 2 (19). С. 8–12.

А.А. Буткарев, ОАО «ВНИИМТ»

РЕЗЕРВЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕГО ДУТЬЯ ЗА СЧЕТ ВНЕДРЕНИЯ ПОДСИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМИ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯМИ

Увеличение температуры нагрева комбинированного дутья в доменные печи является одним из эффективных путей сокращения расхода дорогостоящего кокса и улучшения технико-экономических показателей их работы. Оценить эффективность работы блока доменных воздухонагревателей и определить резервы увеличения температуры горячего дутья можно на основе теплотехнического обследования. Наряду с усовершенствованием конструкции воздухонагревателей, требующей сравнительно высоких капитальных затрат, существенным резервом увеличения температуры горячего дутья является создание автоматизированных систем управления для решения задач оптимального управления процессом получения горячего дутья на основе детерминированных математических моделей. В ОАО «ВНИИМТ» разработана подсистема оптимального управления: верхний имитационно-оптимизирующий уровень воздухонагревателей (ВИОУ-ВН). Подсистема позволяет увеличить температуру горячего дутья на 30–40 °С.

При разработке ВИОУ-ВН важнейшими принципами являются:

1. функционирование в системе управления обобщенной прогнозирующей детерминированной математической модели получения горячего дутья в доменных воздухонагревателях различных конструкций;
2. автоматическая идентификация параметров модели;
3. при формировании критериев и постановок задач оптимизации и создании соответствующей модели управления исходили из важнейших для процесса подготовки горячего дутья показателей: температуры горячего дутья и расхода энергоресурсов, определяющих показатели работы доменного цеха.

ОБОБЩЕННАЯ ПРОГНОЗИРУЮЩАЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Прогнозирующая детерминированная математическая модель строится на основе законов физики процессов, происходящих в газовый и дутьевой периоды работы воздухонагревателей. Она состоит из основных уравнений теплообмена и аэродинамики и усилена комплексными прогнозирующими элементами (расход газа, температура горячего дутья и пр.). Это позволяет:

- определять с высокой точностью, быстротой и надежностью значения недоступных для прямого измерения параметров (“косвенные измерения”);
- прогнозировать при изменении значений управляющих параметров значения показателей: температура горячего дутья, удельный расход газа.

Обобщенная прогнозирующая детерминированная математическая модель, настраиваемая на конкретные характеристики блока доменных воздухонагревателей, включает в себя следующие компоненты [1]:

- модель теплообмена воздухонагревателей в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных;
- модель аэродинамики воздухонагревателей;
- модель прогнозирования расхода газа, построенную на основе уравнений теплового и материального балансов процесса горения, параметрически настраиваемую на конкретный вид топлива (доменный, коксовый, природный или смешанный газ) с учетом предельных параметров работы горелочных устройств.

АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

Параметрами модели, подлежащими идентификации (поиск реальных коэффициентов уравнений модели), являются трудно определяемые, наиболее сложные и часто изменяющиеся величины:

- коэффициент теплоотдачи;
- поверхность теплообмена;
- коэффициенты газодинамического сопротивления;
- теплофизические характеристики насадки воздухонагревателя.

Алгоритмы идентификации построены таким образом, что позволяют в реальном масштабе времени корректировать значения параметров уравнений модели при меняющейся технологической ситуации на объекте управления. Этим достигается высокая точность прогнозирования показателей и максимальная адекватность модели реальному процессу. Создаются условия для эффективного решения задач оптимального управления.

АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Алгоритмы позволяют решить важнейшие задачи оптимального управления технологическим процессом при ограничениях на максимальные и минимальные показатели температуры купола, стыков зон насадки и поднасадочного устройства; скорости нагрева и охлаждения; расходов газа и воздуха на горелочные устройства; времени газового и дутьевого периодов по установленным критериям доменного производства:

- максимум температуры горячего дутья;
- минимум затрат на получение дутья заданных параметров;
- максимум экономического эффекта с учетом затрат на нагрев дутья и экономической эффективности от повышения температуры дутья.

Это позволяет обеспечить необходимые параметры горячего дутья, низкое энергопотребление и долговечность работы оборудования.

Разработанные алгоритмы реализуются на основе прогнозирующей детерминированной математической модели и позволяют в реальном масштабе времени, учитывая текущую технологическую ситуацию на объекте управления, определять значения управляющих параметров, при которых достигается

максимум температуры горячего дутья или максимум экономического эффекта при технологических ограничениях на значения управляющих параметров.

Функционирование ВИОУ-ВН отображено на рисунке 1.

Рис. 1. Структура ВИОУ-ВН

Измеряемые значения параметров технологического процесса подаются в прогнозирующую детерминированную математическую модель. Параметры модели постоянно корректируются алгоритмом идентификации. Такая корректировка осуществляется путем минимизации отклонений величин показателей, рассчитанных по модели, и соответствующих измеренных величин с целью обеспечения высокой точности прогнозирования показателей и максимальной адекватности модели реальному процессу.

Адекватная процессу математическая модель рассчитывает и выдает оператору значения параметров процесса, недоступных для прямого измерения (например, температурные поля в насадке (рисунок 2), КПД воздухонагревателя, доля вредных перетоков и пр.).

Это так называемые «косвенные измерения», которые позволяют оператору более эффективно управлять технологическим процессом.

С использованием алгоритма оптимизации и математической модели в режиме реального времени рассчитываются оптимальные температурно-временные режимы работы ВН в соответствии с заданным критерием оптимизации. Режимы работы ВН поступают в контуры регулирования, оптимизируя работу блока воздухонагревателей:

- автоматически воздействуют на процесс (режим работы on-line);
- или выдаются в качестве совета оператору (режим работы off-line).

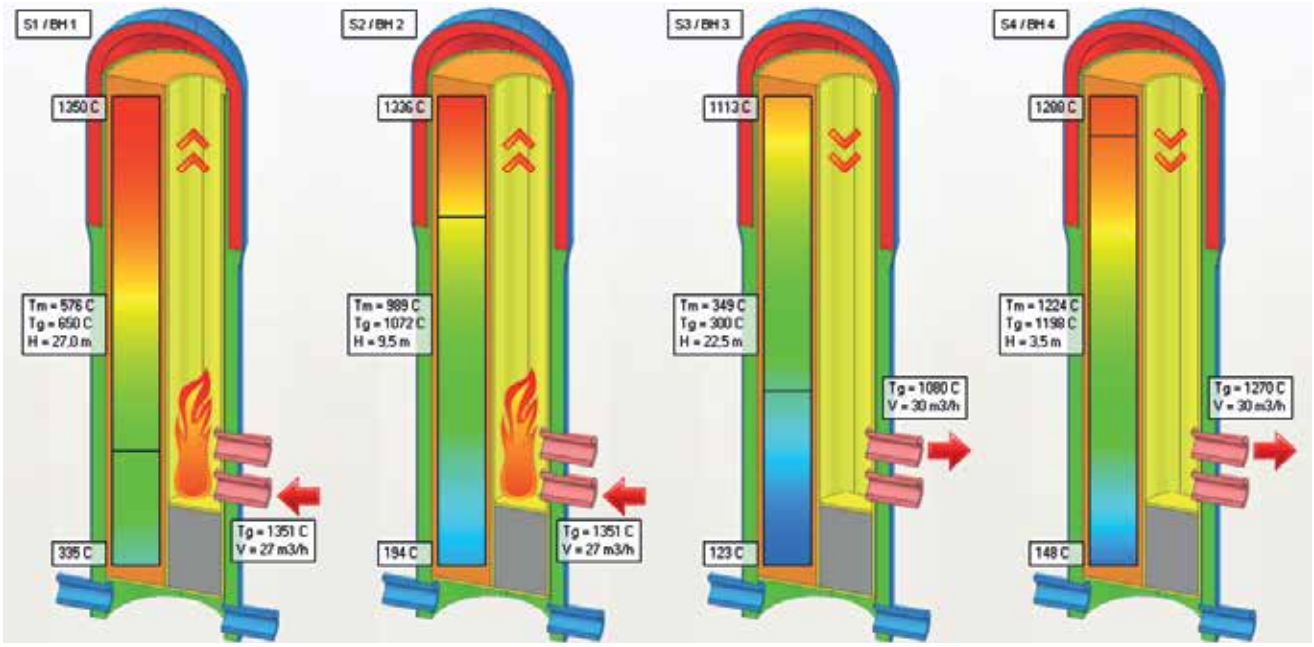


Рис. 2. Пример работы ВИОУ-ВН

Технологический процесс нагрева комбинированного дутья характеризуется большими колебаниями калорийности доменного газа (до 40 %); различным износом и повреждением воздухонагревателей (включая «короткое замыкание», оплавление и засорение насадки и пр.); сезонными колебаниями температуры воздуха горения и температуры холодного дутья; влиянием режимов работы воздухонагревателей друг на друга и прочее. Все это приводит к перерасходу газа, неполному его сгоранию, пониженной температуре купола в период нагрева, большим колебаниям максимальных температур в поднасадочном пространстве к концу газового периода и другое. В результате такой работы блок доменных воздухонагревателей имеет пониженную температуру горячего дутья и как результат — повышенный удельный расход кокса. АСУ ТП с подсистемой ВИОУ-ВН включает решение следующих задач:

- максимизация температуры купола в газовый период в связи с колебаниями химического состава доменного газа и соотношения «газ-воздух»;
- стабилизация соотношения «газ-воздух» в условиях колебания состава газа;
- максимизация температуры горячего дутья путем определения оптимальных температурно-временных режимов работы каждого воздухонагревателя;
- определение оптимального расхода продуктов сгорания и его корректировка с целью достижения предельной температуры в поднасадочном пространстве к концу газового периода;
- косвенные измерения параметров, включая:
  - температурные поля в насадке ВН в различных режимах его работы;
  - КПД ВН;
  - определение доли «коротких замыканий» (вредных перетоков «камера горения-насадка») и др.

На примере теплотехнического обследования работы блока воздухонагревателей ДП-1 ОАО «ЧМК» и внедрения системы ВИОУ-ВН увеличили температуру горячего дутья не менее чем на 30–40 °С путем снижения влияния возмущающих факторов и решения следующих задач [2]:

1. Поддержание в автоматическом режиме максимальной температуры купола при больших колебаниях калорийности доменного газа (до 44%) за счет непрерывной корректировки соотношения «газ-воздух» в оптимальном соотношении при «нагреве ВН».

2. Снижение в автоматическом режиме колебания температуры в поднасадочном пространстве в конце газового периода «нагрев» и максимальный прогрев воздухонагревателя по отходящему

дыму с предельной температурой 400 °С. Использование ВИОУ-ВН позволяет снизить существующие на практике (рисунок 3) и увеличить температуру горячего дутья.

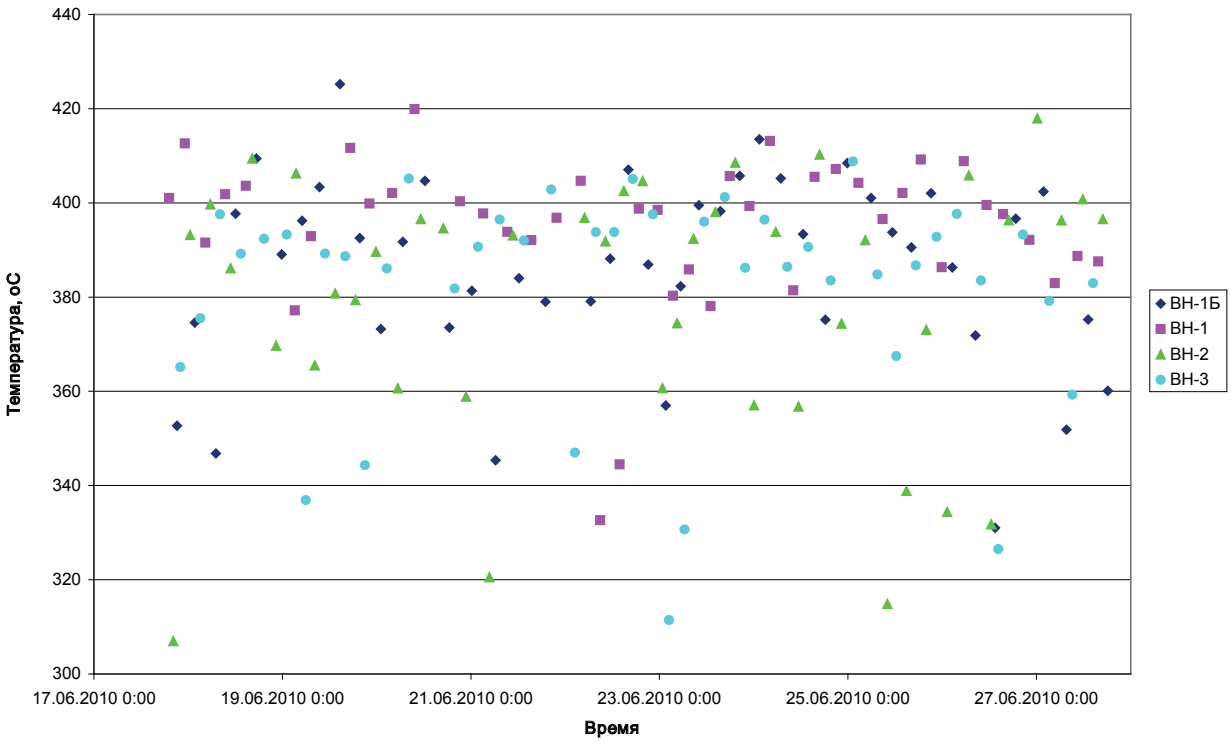


Рис. 3. Пример температуры отходящих газов в поднасадочном пространстве в конце газового периода

Численные вычисления, выполненные с использованием математической модели ОАО «ВНИИМТ», показывают, что работа при максимальной температуре в поднасадочном пространстве 400 °С против 380 °С позволяет увеличить температуру дутья на 11 °С. Это достигается в режиме on-line за счет непрерывного определения количества продуктов сгорания в газовый период, которые необходимо подавать в насадку ВН для обеспечения в конце газового периода предельной температурой 400 °С в поднасадочном пространстве. Данные режимы определяются с учетом текущей производственной ситуации и состоянием конкретного ВН и блока в целом.

Внедрение АСУ ТП с подсистемой «Верхний имитационно-оптимизирующий уровень доменных воздухонагревателей» позволяет увеличить температуру горячего дутья на 30–40 °С.

Значения увеличения температуры горячего дутья и оценка экономической эффективности для конкретного блока доменных воздухонагревателей определяются в результате проведения комплексного теплотехнического обследования по методике ОАО «ВНИИМТ».

Список литературы

1. Shklyar, F.R., Malkin, V.M., Kashtanova, S.P., et al., Domennye vozdukhonagrevateli (konstruktsii, teoriya, rezhimy raboty) [Hot blast stoves: Design, Theory, Operation], Moscow: Metallurgiya, 1982, 176 p.
2. Butkarev A.A., Butkarev A.P., Ptichnikov A.G., Tumanov V.P. An increase the temperature of hot blast of blast-furnace stoves with the help of the optimal control subsystem. Stal [Steel], 2015, no. 5, pp. 28–34.

В.Г. Дружков, И.В. Макарова,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
И.Е. Прохоров, ПАО «ММК»

ПРИЧИНЫ НИЖНИХ ПОДВИСАНИЙ ШИХТЫ В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ И ПУТИ СНИЖЕНИЯ ИХ ВЕРОЯТНОСТИ

Причиной подвисаний шихты в доменных печах является полное уравновешивание веса слоя материалов подъемной силой газового потока и силами трения. В результате слой, играя роль газонепроницаемого поршня, препятствует сходу вышележащих материалов. Чаще всего этот слой расположен в верхней части шахты, на расстоянии 2–6 метров от поверхности засыпи, и в нижней части печи, выше горизонта воздушных фурм. Подразделяют подвисания шихты на «верхние» и «нижние».

«Нижнее» подвисание шихты — одно из тяжелых расстройств доменной плавки [1, 2]. Предположение о том, что с улучшением подготовки проплавляемых железорудных материалов они станут реже, подтвердилось лишь частично. Актуальность этой проблемы сохраняется. Системный подход к её изучению позволил выявить новые моменты.

Рассмотрим подвисания, поднимаясь от горизонта воздушных фурм к распару и низу шахты. Известно, что высокие скорости при выходе газов из фурменного очага стали причиной [3, 4] образования зоны циркуляции и дискретного поступления кокса в фурменный очаг [5]. Но иногда они настолько возрастают, что слой кокса, окружающий рыхлую часть фурменного очага, чрезмерно уравновешивается подъемной силой газового потока. Наступает нижнее подвисание. Размеры рыхлой части увеличиваются, циркуляция кокса прекращается. Когда диаметры горнов были не более четырех метров, можно было видеть в глядельку фурменного прибора диаметрально противоположные фурмы.

Нижние подвисания такого рода были характерны для периода работы доменных печей Японии в конце 70-х годов 20 столетия, когда из-за роста цен на мазут пришлось отказаться от вдувания его в горн печей, оснащенных установками по осушению дутья. Теоретические темпера-

туры горения перед фурмами резко возросли (до 2500 °С и более) и на печах, проплавлявших современное сырьё (содержание мелочи фракции –5 мм не более 3%, колебания содержания железа не превышали +0,3%), было до десятка и более нижних подвисаний шихты в сутки. Только после консервации установок по осушению дутья, увлажнения его мелкораспыленной водой до 50 г/м^3, в результате чего теоретическая температура горения снизилась до 2400 °С, печи стали работать устойчиво.

Второй случай — высокое сопротивление коксовой насадки в заплечиках и распаре в результате:

— вспучивания (вспенивания) железистых шлаков повышенной основности [М.А. Стефанович, Б.Н. Жеребин и др.];
— захлебывания коксовой насадки при излишней интенсивности орошения её чугуном и шлаком [Б.И. Китаев, С.В. Шаврин, Стендиш, Саммамура и др.];
— конденсации SiO на поверхности кусков кокса и уменьшения в связи с этим порозности насадки [И.П. Семик, А.Д. Готлиб и др.];
— снижения нагрева, приводящего к потере подвижности первичных и промежуточных шлаков, образующих с мелочью кокса вязкие массы;
— образования на стенках заплечиков гарнисажа излишней толщины и роста подъемной силы (скорости) газов уже из-за уменьшения сечения рабочего пространства.

Третий случай — высокое сопротивление проходу газов в зоне размягчения и плавления железорудных материалов (ЗРПМ — зона когезии). При этом подъемная сила и силы трения полностью уравновешивают ЗРПМ в результате:

— увеличения ее высоты;
— изменения очертания ЗРПМ, при котором существенно уменьшилась ее поверхность, пронизываемая газом;
— перемещения ЗРПМ из распара в шахту (при разогреве) или в заплечики (при похолодании печи).

Раньше, когда доменные печи были оборудованы конусными загрузочными устройствами, этой проблемы не существовало. В своё время под руководством Н.Н. Бабарыкина (ММК), Б.Л. Лазарева (НТМК) с помощью вертикальных зондов определялась динамика градиентов давления газа по высоте столба шихты. Ожидалось наличие трех максимумов: в верхней части шахты, в зоне когезии и в заплечиках (над фурменными очагами). Но обнаружены были только два. Высокого сопротивления движению газа зона когезии не оказывала. Сейчас понятно почему. При открытии большого конуса даже при системе загрузки РРКК (РРРККК) только в самом начале высыпалось одно железорудное сырье. Далее, согласно закономерностям движения сыпучих сред, образовывались эллипсоиды разрыхления и следовала смесь железорудных материалов и кокса. Поэтому толщина слоя ЖРС была небольшой. Как только были внедрены БЗУ лоткового типа, и материалы стали загружаться отдельными порциями с массой порции ЖРС до 100–120 тонн, то третий максимум появился, и вес самой зоны когезии стал полностью уравновешиваться подъемной силой газового потока и силами трения.

В каждом случае пути снижения вероятности нижних подвисаний будут свои. Их целесообразно подразделить на:

— технологические;
— организационные;
— конструктивные.

К технологическим мероприятиям отнесены средства регулирования или их комплекс, которые возможно реализовывать оперативно.

К организационным отнесены мероприятия требующие согласования с руководством цеха, а иногда и предприятия.

К конструктивным путям отнесены изменения в конструкции доменной печи (профиль печи, огнеупорная футеровка и система охлаждения, металлоконструкции). Данные мероприятия возможно выполнить на капитальных ремонтах I и II разрядов. Конструктивные изменения способствуют изменению градиента давления газа в «нижней зоне» печи.

В таблицах 1–3 приведены некоторые пути снижения вероятности нижних подвисаний при различных случаях, вызывающих чрезмерный рост подъемной силы газового потока.

Таблица 1. Пути снижения вероятности нижних подвисаний при высоких скоростях выхода газа из рыхлой части фурменного очага в результате повышенной теоретической температуры горения

Технологические	Организационные	Конструктивные
Увлажнение дутья. Увеличение расхода топливной добавки. Уменьшение отношения расходов топливной добавки и кислорода	Увеличение нижнего предела крупности кокса, например, с 30 до 35 или 40 мм.	Выполнение заплечиков с переменным углом наклона стен: меньшим внизу и большим вверху [6]

Таблица 2. Пути снижения вероятности нижних подвисаний при высоком сопротивлении коксовой насадки в заплечиках в результате вспучивания шлаков

Технологические	**Организационные**
Изменения режима загрузки, приводящие к более равномерному распределению материалов по радиусу и окружности печи для повышения степени восстановленности железорудных материалов к зоне плавления	Повышение восстановимости железорудного сырья не в ущерб прочности его (например, изменение минералогического состава агломерата и окатышей)

Таблица 3. Пути снижения вероятности нижних подвисаний при высоком сопротивлении проходу газов ЗРПМ в результате увеличения ее высоты

Технологические	Организационные	Конструктивные
Раскрытие периферии и (или) центра. Обеспечение более устойчивого теплового состояния горна	Увеличение температуры начала размягчения и уменьшение интервала температур начала размягчения и плавления (например, увеличение MgO в проплавляемых железорудных материалах)	Увеличение высоты распара и отношения диаметров распара и горна (D/d_r)

Знание технологических явлений при работе доменной печи с нижними подвисаниями позволяет определить наиболее эффективные пути снижения их вероятности в конкретно складывающихся ситуациях.

Список литературы

1. Павлов М.А. Металлургия чугуна. Ч. II. Доменный процесс [Metallurgy of cast iron. PII. Blast furnace process]. М.: Металлургиздат, 1949, 628 с.
2. Жеребин Б.Н. Практика ведения доменной печи [The practice of blast furnace]. — М. Металлургия, 1980, 248 с.
3. Стефанович М.А. О зависаниях шихты при обогащении дутья кислородом / Сталь [Steel]. 1960, №, с. 673–680.
4. Стефанович М.А., Кропотов В.К. Соотношение сил, влияющих на сход шихты на границе фурменных очагов. Известия Вузов. Черная металлургия [News Universities. Ferrous metallurgy]. 1974, № 6, с. 28–31.
5. Фиалков Б.С., Плицин В.Т. Характер горения кокса в доменной печи и его взаимодействие с механическими процессами. Тезисы докладов н-т конференции: «Газодинамика и механика движения шихты в доменных печах». Свердловск, ВНИИМТ, 1969, с. 13–14.
6. Бабарыкин Н.Н. Движение шихты и газов в доменной печи: Курс лекций [The movement of charge and gases in the blast furnace: course of lectures]. Магнитогорск: МГМИ, 1994, 111 с.

А.Ю.Чернавин, В.А. Кобылев, Д.А. Чернавин,
ООО «Проминтех-НКА»

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОКСА, ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ШИХТЫ И РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ

Для эффективной работы доменной печи и ведения доменной плавки первостепенное значение имеют металлургические свойства кокса. Наряду с привычными CSR, CRI, прочностью, истираемостью, содержанием золы, серы, влаги, имеющими значение на верхних горизонтах доменной печи, важно и взаимодействие кокса с расплавом ЖРС в зоне плавления. Межфазное взаимодействие кокса и расплава с образованием химических соединений и дренирование коксом расплава способно значительно влиять на ход доменной плавки в лучшую или худшую сторону. Этой проблеме было уделено большое количество исследований и выявлены некоторые особенности:

1. зашлаковывание кусков кокса на малую или большую глубину в зависимости от его металлургических свойств;
2. отличие поглощённого расплава по химическому составу от среднемассового состава шлакообразующих железорудной части, т.е. расплав «внутри» кокса отличается от расплава «снаружи»;
3. горючесть кокса (отношение теоретически необходимого количества кислорода для сжигания одной единицы массы кокса к практически затраченному количеству кислорода) в потоке высоконагретого воздушного дутья резко способна ухудшиться у зашлакованных коксов;
4. поглощённый коксовым куском шлаковый расплав способен интенсивно восстанавливаться вплоть до образования карбидов кремния [1] (табл. 1).

Таблица 1. Долевое содержание фаз в различных образцах кокса, в том числе карбида кремния

Образец	Фазовый состав	Содержание, %
Кокс 1	Углерод Карбид кремния, SiC Форстерит, Mg_2SiO_4 Диопсид, $CaMgSi_2O_6$	70 22 5 3
Кокс 2	Углерод Карбид кремния, SiC Неизвестная фаза	86 12 2
Кокс 3	Углерод Диопсид, $CaMgSi_2O_6$	72 28
Кокс 4	Углерод Геленит, $Ca_2Al(SiAl)O_7$ Форстерит, Mg_2SiO_4 Карбид кремния, SiC	77 17 4 2
Кокс 5	Углерод Карбид кремния, SiC	89 11

Выявленные карбиды кремния в структуре кокса (рисунок 1) оказывают негативное влияние на доменный процесс, вызывая:

1. непроизводительные затраты углерода кокса на образование SiC;
2. ухудшение показателей горючести и теплотворной способности коксов;
3. формирование негорючих и неплавких масс после газификации кокса; затруднённую ассимиляцию этих масс в чугунах и промежуточных шлаках;
4. ухудшение металлургических свойств конечного шлака и загрязнённость чугуна, проявляющаяся выделением «спели» на поверхности жидкого чугуна при его транспортировке.

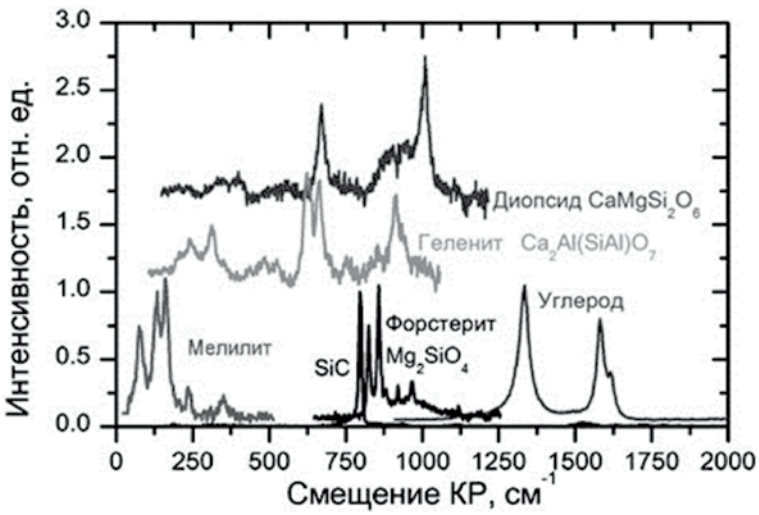


Рис. 1. Величины концентраций фазовых составляющих в зашлакованных коксах

Данные особенности оказывают влияние на эффективность выплавки чугуна (табл. 2). Основой снижения затрат при выплавке чугуна могут служить следующие технологические и потребительские свойства кокса:

1. низкая зольность (не более 5%): кардинальное перераспределение серы между продуктами плавки вызывается устранением эффекта смачивания поверхности кокса шлаковым расплавом, что обеспечивает разблокирование жидкой фазой коксовой насадки для беспрепятственного удаления серы с газовой фазой (табл. 3);
2. низкая смачиваемость доменным расплавом и, как следствие, высокая дренажная способность по отношению к шлаковому расплаву (не менее 75,0%);
3. оптимальные величины горючести (не менее 40%), реакционной способности (23÷28%) и послереакционной прочности (не менее 65%);
4. минимальная склонность к шлакопоглощению и продуцирование карбидов кремния в поглощённом силикатном расплаве;
5. отсутствие минеральных форм серы.

Указанный комплекс свойств коксов должен существенно улучшать процессы тепломассообмена в горне доменной печи, в том числе оптимизацию потока горновых газов, что в свою очередь обеспечивает:

1. уменьшение износа футеровки и элементов системы охлаждения печи, что равнозначно уменьшению эксплуатационных и инвестиционных затрат на 50÷300 рублей с каждой тонны выплавленного чугуна;
2. уменьшение величины тепловых потерь с охлаждающей водой, что эквивалентно уменьшению удельного расхода кокса на 8÷24 кг/т чугуна;
3. улучшение степени использования топливных добавок (природный газ, пылеугольное топливо), что эквивалентно уменьшению удельного расхода кокса на 10÷15 кг/т чугуна;
4. 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.

Таблица 2. Расчётные величины статей снижения затрат кокса, железа и финансовых средств на выплавку одной тонны чугуна

Статьи затрат, их величины и механизм воздействия для их снижения	Величина снижения затрат	
	Абсолютная, кг/т чуг.	Стоимостная, руб./т чуг.
Углерод кокса на карбидообразование (SiC) при типовом режиме (10÷20% SiC) и снижении его содержания в коксе (0÷5% SiC).	5,3	53
Снижение тепловых потерь через систему охлаждения низа шахты, распара и заплечиков на 25 МВт	22,8	228
Улучшение коэффициента замены кокса природным газом с 0,80 до 0,90 при его удельном расходе 110÷120 м^3/т чуг.	11,0÷12,0	110÷120
Улучшение степени использования восстановительной энергии печных газов η_{CO+H_2} с 45% до 49% отн., т.е. на 4%	12,0	120
Уменьшение потерь углерода/железа в виде минерального «слоя» в чугуновозах миксерного типа и в миксерах ККЦ	3,7/15	37/83
Уменьшение износа огнеупорной футеровки и водоохлаждаемых элементов конструкции печи	— / —	— / 497

Таблица 3. Компонентный состав продуктов плавки (чугун)

Вид кокса	Доля дренировавшего чугуна	Химический состав чугуна, %		
		C	Si	S
Не смачиваемый	99,5	6,0	0,3	0,022
Смачиваемый	95,0	4,5	0,6	0,020

Кокс, не смачиваемый расплавами чугуна и шлака, обладает высокой дренажной способностью. Кокс, обладающий высокой смачиваемостью шлаковым расплавом, обладает низким показателем дренажной способности. Такой кокс в процессе плавления ЖРМ и фильтрации расплава характеризуется наибольшей длительностью процесса и наибольшей убылью массы (объема) коксовой насадки, что отражает низкую производительность и высокий расход кокса в реальной доменной плавке.

При довольно близких показателях технического анализа, CSR и CRI между двумя образцами кокса в процессе плавления доменной шихты возможна принципиальная разница в дренажной способности продуктов плавки. Это может оказывать существенное влияние на ход доменной плавки.

Результаты определения дренажной способности коксов по отношению к расплаву доменного шлака характеризуют процессы в зоне плавления доменных печей (степень напряжения по газо-гидродинамическим условиям).

Не смачиваемый расплавом кокс является идеальным материалом для формирования коксовой насадки горна доменных печей и подходит для доменной плавки, основанной на комбинации 2 типов кокса — низкореакционного и умеренно — либо высокореакционного.

Смачиваемый расплавом кокс не пригоден для использования в доменной плавке как в качестве добавки для формирования насадки горна, так и в качестве топлива при сжигании в фурменных очагах.

Также целесообразно определение дренажной способности кокса по отношению к шлакам с различным модулем основности по CaO/SiO_2. Зависимость дренажной способности кокса от модуля основности ЖРМ можно представить так, как изображено на рис. 2

Область «1» (В = 1,0–1,2) характеризует промежуточные (без золы кокса) шлаки в области плавления реальных доменных печей.

Область «2» (В = 0,8–1,0) характеризует конечные (с золой кокса) шлаки в области фильтрации на горизонте фурменных очагов.

Область «3» (В = 1,2–1,5) характеризует перспективу работы зоны плавления с ПУТ, а также получение низкокремнистого чугуна.

Область «4» (В = 0,6–0,8) наиболее заманчива и опасна (низкая фильтруемость шлаков) для доменщиков, стремящихся работать на «кислых» легкоплавких шлаках.

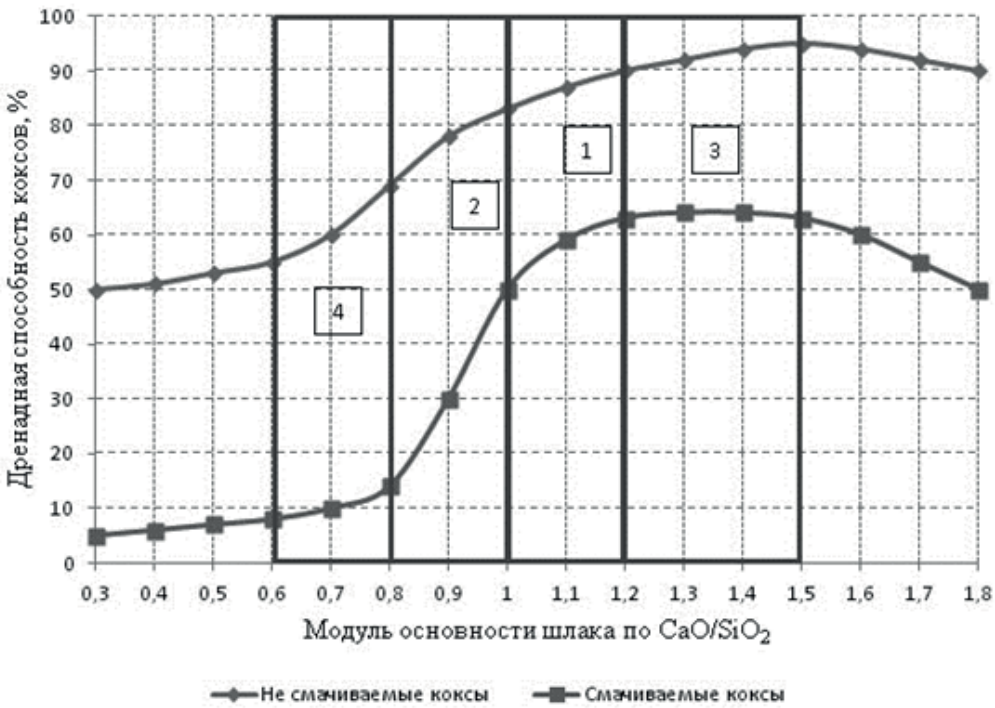


Рис. 2. Зависимость дренажной способности коксов от модуля основности шлака

При исследовании смачиваемых и не смачиваемых коксов было выявлено различие в химсоставе чугуна, дренировавшего шлака и шлака «зависшего» на коксовой насадке (таблица 3, 4).

Таблица 4. Компонентный состав продуктов плавки (шлак)

Вид кокса	Доля дрен. шлака, %	Химсостав дренировавшего шлака, %				Доля зависш. шлака, %	Химсостав зависшего шлака, %			
		CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO		CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO
Не смачиваемый	90,0	40,0	40,0	10,0	8,0	10,0	10,0	55,0	20,0	15,0
Смачиваемый	60,0	60,0	30,0	5,0	4,0	40,0	8,0	60,0	20,0	12,0

Принципиальные различия в характеристиках сформированного чугуна и конечного шлака на коксах смачиваемых и не смачиваемых следующие:

1. высокая массовая доля углерода, гарантирующая устойчивое получение заэвтектойдных чугунов с большим резервом жидкотекучести;
2. пониженная массовая доля кремния в чугуне, как следствие меньшего взаимодействие шлакового расплава с коксом;
3. меньшее адсорбирование коксом из шлакового расплава тугоплавких соединений на основе кремнезёма (стекла) с включениями тугоплавких соединений типа $SiO_2 \cdot Al_2O_3$ (шамот) и $SiO_2 \cdot MgO$ (форстерит), что предотвращает трансформацию легкоплавкого однокальциевого силиката (модуль основности 1,0 ед.) в тугоплавкий двухкальциевый (модуль основности 2,0 ед.);
4. меньший уровень зашлакованности поверхности и межкусковых пространств коксовой насадки, гарантирующий активизацию процессов приёма дутья доменной печью и отдачи продуктов плавки на выпусках.

Помимо металлургических свойств кокса не менее важны для ведения хода доменной плавки металлургические свойства железорудного сырья. Наряду с металлургическими свойствами, характеризующими поведение железорудных материалов в «сухой» зоне доменной печи, имеет значение фильтруемость продуктов плавки через коксовую насадку.

Фильтруемость понимается как отношение массы продуктов плавки (металла и шлака), прошедших через коксовую насадку, к общей массе продуктов плавки (исходных металла и шлака). Моделирование процесса фильтрации продуктов плавки ЖРС через коксовую насадку производили по специально разработанной методике [2].

Одним из путей интенсификации доменной плавки является повышение газопроницаемости нижней части столба шихтовых материалов. Это может быть достигнуто путем улучшения физико-химических свойств жидкой фазы, т.е. увеличением подвижности шлака сразу после его расплавления за счет изменения химического состава железорудной шихты. Движение жидких продуктов плавки в доменной печи осуществляется путем фильтрации через коксовую насадку. Как правило, с фильтруемостью первичного шлака и связаны основные трудности ведения доменной плавки. Таким образом, для интенсификации процессов в нижней части доменной печи необходимо улучшить фильтруемость первичного шлака, образующегося при плавлении ЖРС.

При определении фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку было выявлено влияние концентрации и минеральной формы магнезиальных добавок на показатели фильтруемости. Для этого были проведены фильтрации разных по содержанию MgO ЖРМ через промышленный кокс КХП ПАО «ММК», а для оценки влияния минеральной формы магнезиальных добавок были проведены исследования агломерата ОАО «ВГОК», произведенного из различных шихт. Для оценки влияния минеральной формы марганца в качестве ЖРС были использованы предварительно восстановленные агломераты ОАО «ЧМК», полученные в лабораторных условиях с различными видами марганцевых добавок, которые фильтровались через промышленный кокс ОАО «ЧМК».

ВЛИЯНИЕ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ФИЛЬТРУЕМОСТЬ РАСПЛАВА АГЛОМЕРАТА ПАО «ММК»

Во всех опытах использовали лабораторные агломераты, полученные из шихт на основе аглошихты ПАО «ММК» с различным содержанием MgO, а в качестве коксовой насадки — промышленный кокс ММК. Химический состав фильтруемых через коксовую насадку агломератов ОАО «ММК» приведен в таблица 5.

Показатели фильтруемости продуктов плавления металлизованных окатышей ССГПО и агломератов ММК через коксовую насадку приведены в табл. 6.

Таблица 5. Химический состав ЖРМ

Агломерат	Содержание, %								
	$Fe_{общ}$	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	TiO_2	CaO/SiO_2
Окатыши ССГПО									
	63,0	3,95	5,26	1,9	1,08	1,02	0,26	0,35	0,21
Агломераты ОАО «ММК»									
М1	61,57	16,76	5,04	2,57	8,14	1,68	0,23	0,4	1,62
М6	58,97	9,22	5,92	1,91	6,14	2,48	0,44	0,41	1,04
М8	57,93	12,09	6,27	2,04	7,89	2,39	0,38	0,39	1,26
М9	55,81	9,99	5,86	2,0	10,55	2,57	1,05	0,26	1,8
М12	56,07	9,13	6,45	1,73	9,58	1,79	0,44	0,37	1,49
М13	55,45	11,01	7,1	1,86	8,96	2,23	0,42	0,4	1,26
М17	58,64	10,16	6,32	2,0	5,84	2,32	0,49	0,41	0,92
М18	58,31	12,86	5,59	2,18	5,43	2,21	0,54	0,45	0,97
М22	54,44	–	5,72	1,96	12,59	2,62	1,03	–	2,2

Таблица 6. Показатели лабораторного процесса фильтрации через кокс продуктов плавления металлизованных окатышей ССГПО и агломератов ММК

Вид сырья	Степень фильтруемости продуктов плавки, %	Степень фильтруемости шлака, %	Время фильтрации, мин
Окатыши ССГПО	94,0	68,1	48
М1	90,9	57,1	109
М6	95,7	25,4	92
М8	97,2	74,9	97
М9	96,1	73,1	48
М12	89,9	37,6	75
М13	93,5	71,6	120
М17	Не фильтруется	Не фильтруется	20
М18	Не фильтруется	Не фильтруется	20
М22	93,7	74,7	79

Как показывают результаты исследований, состав агломерационной шихты существенно влияет на фильтруемость продуктов плавки и особенно шлака через коксовую насадку. Степень фильтруемости продуктов плавки низкоосновных окатышей ССГПО составила 94%, а вот шлак из окатышей фильтруется удовлетворительно.

На основании проведенных исследовании фильтруемости железорудных шихт ОАО «ММК» через коксовую насадку можно сделать вывод о том, что агломераты с оптимальным содержанием в шихте MgO обладают более высокой фильтруемостью первичных шлаков через коксовую насадку.

Повышение основности агломерата (CaO/SiO_2) с 1,8 до 2,2 ед. наряду с увеличением содержания MgO не приводит к заметному ухудшению фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку (при условии ввода марганца в состав агломерата). Анализ фильтруемости высокоосновных агломератов, содержащих более 2,5% MgO, показал, что благоприятное влияние оксида магния на фильтруемость шлака имеет экстремальный характер. Следует отметить, что при пониженной основности ввод марганцевой добавки в аглошихту с повышенным содержанием MgO не улучшает фильтруемость шлака через коксовую насадку.

Положительное влияние оказывает ввод в аглошихту марганцевой руды для агломератов на основе базового состава железорудной части и при увеличении в шихте доли MgO. Добавка марганецсодержащих материалов увеличивает степень фильтруемости продуктов плавки, в том числе и шлакового расплава, но это увеличение носит экстремальный характер. Так введение в аглошихту М13 дополнительно 1,2% марганцевой руды повлекло снижение фильтруемости шлака. Таким образом, эффективным средством улучшения высокотемпературных свойств и фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку является ввод в агломерационную шихту марганцевой руды в количестве до 25 кг/т.

Совершенно не фильтруются продукты плавки шихт с агломератами М17–М18, имеющими пониженную основность (В≈1 ед.). Продукты плавки образуют вспененную массу и не фильтруются.

Снижение фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку приводит к тому, что шлак обогащается оксидом кальция и образует тугоплавкий двухкальциевый силикат ($2CaO{\cdot}SiO_2$), что приводит к ещё большему снижению фильтруемости.

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ФИЛЬТРУЕМОСТЬ АГЛОМЕРАТОВ ОАО «ВГОК»

На основании проведенных исследований фильтруемости железорудных шихт ОАО «ММК» через коксовую насадку можно говорить, что железорудная шихта на основе агломератов с повышенным содержанием в шихте MgO обладает более высокой фильтруемостью продуктов плавки первичных шлаков через коксовую насадку, при этом не было определено какое имеет значение форма и структура вводимой магнезии.

Для определения значения формы магнезии на базе аглошихты ОАО «ВГОК», были получены в лабораторных условиях 4 агломерата с примерно одинаковым содержанием MgO, полученные путем ввода в шихту различных магнийсодержащих материалов. Влияние минералогической формы MgO на фильтруемость шлакового расплава было исследовано путем фильтрации через кокс продуктов плавления этих агломератов. Химический состав агломератов приведен в табл. 7, а показатели фильтруемости продуктов плавки — в табл. 8.

Анализ таблицы 8 показывает разный характер влияния на фильтруемость продуктов плавки и особенно шлака различных типов магнезиальных добавок. Причиной являются различные минеральные формы, напрямую влияющие на поведение оксида магния при формировании минеральной структуры агломерата.

Сидерит — минерал осадочного происхождения, представляющий собой карбонаты железа и магния. В сидерите магний изоморфно замещает железо, он не может переходить в силикаты, так как связан с железом. В процессе плавления вначале плавится железо, а затем тугоплавкий магний, который может адсорбироваться на коксе в виде отдельной тугоплавкой оксидной фазы. Образование

этой фазы, возможно, и предопределило самую низкую фильтруемость шлака сквозь коксовую насадку из исследованных нами магнезиальных добавок.

Таблица 7. Химический состав агломерата ВГОК с магнезиальными добавками

Содержание в агломерате, %:	Источник MgO			
	Бакальский сидерит (базовый)	Дунит	Доломит	Известь ожелезнённая
Fe	57,5	57,5	57,7	57,7
SiO_2	6,39	6,13	6,09	6,48
CaO	6,15	6,49	6,39	5,27
MgO	2,28	2,04	2,15	2,17
CaO/SiO_2	0,96	1,06	1,05	0,81
$(CaO+MgO)/SiO_2$	1,32	1,39	1,40	1,15

Таблица 8. Показатели фильтрации продуктов плавления через кокс агломератов ОАО «ВГОК»

Наименование показателя	Источник MgO			
	Бакальский сидерит (базовый)	Дунит	Доломит	Известь ожелезнённая
Фильтруемость, %: — продуктов всего — шлака	 92,92 73,95	 95,59 84,24	 95,03 82,29	 98,71 95,25
Продолжительность, мин	100	68	60	54

Дунит — ультраосновная магматическая порода, представляющая собой магнезиально-железистый силикат с формулой $(Mg,Fe)_2[SiO_4]$. Содержание Fe и Mg в твердом растворе варьирует между двумя конечными членами непрерывного изоморфного ряда оливинов: форстеритом $Mg_2[SiO_4]$ и фаялитом— $Fe_2[SiO_4]$. Оливин слагает основные и ультраосновные магматические породы.

В системе MgO—SiO_2 образуются два характерных соединения:

1) форстерит Mg_2SiO_4 содержит 57,2% MgO и 42,8% SiO_2, без разложения плавится при 1890°С и не имеет модификационных превращений при нормальном давлении;

2) метасиликат магния $MgSiO_3$ содержит 40% MgO и 60% SiO_2, плавится при 1557°С с образованием форстерита и расплава, обогащенного кремнеземом.

При взаимодействии метасиликата с оксидом магния возможна реакция конверсии в форстерит:

$$MgSiO_3 + MgO \rightarrow Mg_2SiO_4$$

При температурах выше 1200 °С оксид железа реагирует с форстеритом с образованием магнезита и магнезиоферрита:

$$Mg_2SiO_4 + Fe_2O_3 \rightarrow MgSiO_3 + MgFe_2O_4$$

Магнезиоферрит образует с форстеритом систему с эвтектикой при 1690°С, то есть на 200°С ниже температуры плавления форстерита. Чем больше в оливине оксида железа, тем больше образуется расплава при этой эвтектической температуре.

При наличии в исходном сырье оксида алюминия в форстеритовых соединениях образуется шпинель, находящаяся в твердом растворе магнезиоферрита, что еще больше понижает эвтектическую

температуру. Форстерит с оксидом кальция образует монтичеллит $CaMgSiO_4$, плавящийся при 1492°С. Реакции образования форстерита и магнезиоферрита протекают в твердой фазе. Реакция между окисью магния и кремнеземом начинается при 650°С, первичным продуктом в ней всегда, независимо от соотношения исходных компонентов, является форстерит. Это обусловливается более простым строением его решетки, состоящей из изолированных кремнекислородных тетраэдров с ионами магния между ними, тогда как для образования метасиликата необходимо связывание тетраэдров в цепи.

Доломит — минерал осадочного происхождения с химической формулой $CaMg(CO_3)_2$. Mg^{2+}, в отличие от сидерита изначально изоморфно, не входит в кристаллическую решетку железа, и процесс фильтрации протекает по схеме схожей с дунитом. Этим и обуславливаются близкие с дунитом показатели фильтруемости шлака и более высокие показатели фильтруемости по отношению к сидериту.

Известь доломитизированная ожелезненная, являясь искусственным флюсом, содержит связанный в маложелезистом силикате магний, при этом проявляется высокая способность оксида магния входить в состав легкоплавких силикатов. Этот вид магнезиальной добавки показал самую высокую фильтруемость шлака через коксовую насадку.

Таким образом, для агломерата ВГОК замена магнезиальной добавки (сидерита) на другие виды магнийсодержащих материалов способствует существенному улучшению фильтруемости шлака через коксовую насадку.

ВЛИЯНИЕ МАРГАНЦЕВЫХ ДОБАВОК НА ФИЛЬТРУЕМОСТЬ АГЛОМЕРАТОВ ОАО «ЧМК»

В целях определения характера воздействия марганца на процессы фильтрации продуктов плавки агломератов через коксовую насадку была проведена серия экспериментов по той же методике, но с использованием агломератов ОАО «ЧМК» и окатышей КостГок, химический состав которых приведен в таблица 9.

Во всех опытах в качестве коксовой насадки использовали промышленный кокс ООО «Мечел-Кокс».

Таблица 9. Химический состав ЖРМ

Агломерат	Содержание, %							
	$Fe_{общ}$	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	CaO/SiO_2
Окатыши КостГок								
	65,23	2,17	5,44	0,37	0,57	0,2	0,03	0,1
Агломераты ОАО «ЧМК»								
Ч1	55,76	7,1	7,47	1,32	10,02	1,31	0,54	1,34
Ч2	55,8	11,99	6,9	1,46	9,2	1,43	0,69	1,33
Ч3	56,3	15,22	7,1	1,75	8,9	1,06	0,49	1,25
Ч4	56,6	14,37	7,0	0,69	8,9	1,13	0,69	1,27
Ч5	56,2	12,84	7,6	1,77	9,1	1,28	0,65	1,20
Ч6	56,20	12,14	6,80	2,20	8,40	1,45	0,50	1,24
Ч7	56,80	11,46	7,30	1,95	7,90	1,56	0,46	1,08
Ч8	57,10	13,70	7,40	2,10	8,20	1,43	0,65	1,11
Ч9	55,30	14,71	8,30	2,30	9,00	1,48	1,55	1,08
Ч10	57,40	13,09	7,30	2,20	7,40	1,13	0,59	1,01
Ч11	55,60	12,14	6,00	2,10	8,90	2,10	0,19	1,47

Проведенные исследования показали (таблица 10), что в отличие от слабоофлюсованных окатышей ССГПО при плавке неофлюсованных окатышей КостГок в нижнем тигле присутствует только чугун. Кислый шлак не фильтруется через коксовую насадку и весь остается в виде неплавких масс на поверхности кокса. Выплавка чугуна с использованием неофлюсованных окатышей имеет осложнение в нижней части печи, связанное с образованием тугоплавких первичных шлаков, и, как показали исследования, ввод марганцевого концентрата в шихту неофлюсованных окатышей не способствует улучшению фильтруемости шлака.

Таблица 10. Показатели лабораторного процесса фильтрации через кокс продуктов плавления металлизованных окатышей КостГок и агломератов ЧМК

Вид сырья	Степень фильтруемости продуктов плавки, %	Степень фильтруемости шлака, %	Время фильтрации, мин
Окатыши КостГок	93,9	0	61
Ч1	97,0	94,8	58
Ч2	94,4	73,9	61
Ч3	90,7	37,9	50
Ч4	89,8	59,8	45
Ч5	89,5	57,6	34
Ч6	86,8	50,8	47
Ч7	89,6	66,4	40
Ч8	96,5	88,4	35
Ч9	91,2	63,8	49
Ч10	90,6	58,5	48
Ч11	90,7	62,9	47

При работе доменных печей на разноосновном сырье повышается газодинамическая напряженность нижней зоны, что сдерживает рост производства и снижение расхода кокса. Наиболее эффективным решением этой проблемы является переход на выплавку чугуна из офлюсованных окатышей и агломерата. В этом случае железорудные компоненты доменной шихты обладают близкими физико-химическими свойствами, особенно важными в части плавления и фильтрации шлака через коксовую насадку.

Сопоставительный анализ результатов фильтраций агломератов Ч3÷Ч5 показал, что ввод в аглошихту манганокальцитового флюса способствует улучшению фильтруемости шлаковой части продуктов плавки через коксовую насадку. Использование аглофлюса взамен сырого известняка и обожженной извести приводит к такому же результату, что и ввод манганокальцитового флюса, при этом дополнительно снижается продолжительность фильтрации продуктов плавки через коксовую насадку, что обусловлено, прежде всего, механизмами подавления карбидообразования и снижения вязкости шлака. Оксид марганца, достигая коксовой насадки, разжижает шлак и снижает температуру плавления, что благоприятно влияет на фильтруемость шлаков.

После проведения качественного анализа шлака, оставшегося в коксовой насадке, было установлено, что шлаковая часть состоит из минералов на основе оксидов кремния, алюминия и магния. Оксидов кальция и марганца в оставшемся шлаке практически нет. В отличие от агломерата Ч1 состояние тиглей после испытаний агломератов с марганцевой добавкой показывает, что в обоих случаях шлак сформировался необходимой основности и хорошо профильтровался через коксовую насадку.

При изучении фильтруемости продуктов плавки лабораторных агломератов Ч6÷Ч11 через коксовую насадку установлено что агломерат Ч6 отличается от агломератов первой серии более низкой степенью фильтрации шлака. Ввод в шихту марганца и снижение основности способствует улучшению этого показателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Межфазное взаимодействие кокса и расплава ЖРС с образованием химических соединений и дренирование коксом расплава способно значительно влиять на ход доменной плавки в лучшую или худшую сторону.

Смачиваемые расплавом коксы зашлаковываются с образованием различных соединений, в том числе с образованием карбидов кремния при восстановлении кремния из шлакового расплава.

Карбид кремния в структуре кокса негативно влияет на ход доменной плавки, вызывая непроизводительные затраты углерода кокса, снижение показателя теплотворности кокса.

Не смачиваемый расплавом кокс является идеальным материалом для формирования коксовой насадки горна доменных печей и подходит для доменной плавки.

Фильтруемость шлака расплава при офлюсовании ЖРМ магнезиальными и марганцовистыми добавками имеет экстремальный характер и зависит от основности шлака.

Улучшение фильтруемости офлюсованных ЖРМ путем ввода в аглошихту магнезиальных и марганцовистых добавок является следствием увеличения жидкоподвижности первичного шлака за счёт образования соединений с низкой температурой плавления.

Список литературы

1. Стормс Э. Тугоплавкие карбиды: Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 485 с.
2. 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.

Дитер Беттингер (Dieter Bettinger), Харальд Фритшек (Harald Fritschek), Томас Кронбергер (Thomas Kronberger), Мартин Шалер (Martin Schaler). Primetals Technologies Austria
Иоахим Маухарт (Joachim Mauhart), Voestalpine Stahl GmbH
СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА — ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ И ЗНАНИЯМИ 128

Н.А. Спирин, В.В. Лавров, О.П. Онорин, ФГАОУ ВПО «УрФУ»
В.Ю. Рыболовлев, Д.А. Шнайдер, А.В. Краснобаев, ПАО «ММК»
НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩИХ СИСТЕМ В ПИРОМЕТАЛЛУРГИИИ (НА ПРИМЕРЕ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА 137

А.В. Павлов А.В., А.А. Полинов, ПАО «ММК»
Н.А. Спирин, О.П. Онорин, В.В. Лавров, И.А. Гурин, ФГАОУ ВПО «УрФУ»
РЕШЕНИЕЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ..... 145

А.А. Полинов, И.Е. Прохоров, ПАО «ММК»
В.М. Паршаков, ООО «АКОММ»
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
КОНТРОЛЬ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ В КАЧЕСТВЕ «ОБРАТНОЙ СВЯЗИ» ПРИ ВЫБОРЕ РЕЖИМА РАБОТЫ БЗУ..... 159

В.М. Паршаков В.М., ООО «АКОММ»
А.А. Полинов, Д.А. Шнайдер, И.Е. Прохоров, А.В. Павлов, А.В. Колосов, Д.И. Селезнев, П.Ю. Довженко ПАО «ММК»
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОЦЕНКИ ГАЗОДИНАМИКИ, МАССО- И ТЕПЛООБМЕНА И ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ ПАО «ММК» И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ 177

Раздел IV
ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ. ВНЕДРЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЧЕРНУЮ МЕТАЛЛУРГИЮ

В.М. Паршаков, В.А. Борисенко, ООО «АКОММ»
И.Е. Прохоров, П.Ю. Довженко, ПАО «ММК»
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
НЕПРЕРЫВНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ КАЖДОГО ФУРМЕННОГО ОЧАГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОСЪЕМА И УПРЕЖДАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ НА ЭТОЙ ОСНОВЕ НАГРЕВА ГОРНА И ПРОГНОЗ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ В ЧУГУНЕ 204

Ю.А. Чесноков, ИМЕТ УрОРАН
ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА «ИНТЕРАКТИВНЫЕ РАСЧЕТЫ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ» 210

Д.А. Шнайдер, А.В. Липатников, А.Е. Шмелева, Е.В. Астратова, А.А. Полинов, А.В. Колосов, И.Е. Прохоров, ПАО «ММК»
Т.А. Барбасова, Л.С. Казаринов, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ)
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРВОГО ПЕРЕДЕЛА ПАО «ММК» НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МОДЕЛЬНО-УПРЕЖДАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ 217

С.В. Филатов, А.И. Дагман, ПАО «НЛМК»
С.А. Загайнов, Л.Ю. Гилева, УрФУ
ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ КОМПЛЕКСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОЦЕССОМ 227

Дитер Беттингер, Харальд Фритшек, Томас Кронбергер, Мартин Шалер, Primetals Technologies
Иоахим Маухарт, Voestalpine Stahl GmbH

СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА — ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ И ЗНАНИЯМИ

АННОТАЦИЯ

За счет использования экспертных систем индивидуальное суждение об условиях процесса и необходимых действиях подкрепляется системами поддержки принятия решений, основанных на определенных правилах, с встроенной стратегией стандартных операций. Поскольку экспертная система содержит ключевую операционную стратегию, то она отражает центральное операционное ноу-хау, которое можно дорабатывать и расширять за счет получения новых сведений и их осмысления, чтобы лучше соответствовать производственным целям и требованиям по снижению конкретных рисков. Производственный процесс под управлением экспертной системы ведет к повышению эксплуатационных характеристик доменной печи, снижению расхода топлива, стабильности ее функционирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Цифровизация, доменная печь, оптимизация процесса, модели процесса, экспертная система, замкнутый цикл, извлечение данных.

1. ВВЕДЕНИЕ

Системы оптимизации процесса используются для стандартизации работы металлургических заводов. В данной работе рассматривается каким образом система оптимизации процесса может сни-

жать операционные риски и при этом воздействовать на снижение стоимости и одновременно служить важным инструментом для накапливания знаний и управления ими.

2. ГЕНЕРИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ДАННЫХ

Доменная печь обеспечивает поступление данных (data) от многочисленных датчиков. Модели процесса позволяют извлекать соответствующую информацию (information) или предоставить суть в сжатом виде из огромного количества цифр.

Растущее внимание к ценности данных можно передать фразой: «Данные — это новая нефть. Она ценна, но ее нельзя использовать без переработки». Эту фразу произнес математик Клив Хамби в 2006 году [4]. В контексте данной цитаты полагается оправданным пересмотреть роль моделей процесса в деле переработки данных в информацию в качестве основы для получения более совершенных решений в области комплексных данных.

Перед тем как привести два примера хотелось бы подчеркнуть, что система оптимизации доменного процесса VAiron основана на гипотезе, подразумевающей, что «информация без действий бесполезна». В этом контексте результаты всех моделей и методы анализа данных тесно связаны с четкими идеями соответствующих действий.

Модель износа пода (см. рис. 1, левая часть) предоставляет точную информацию об оставшейся толщине стенок, темпах износа, делая различия между сплошной стенкой и настылью, выявляя и устраняя ложные измерения, в то время как правильная интерпретация таких чистых сырых данных без такой подготовки просто невозможна.

Другим хорошим примером сжатия информации является усовершенствованная модель распределения шихты (см. рис. 1, правая часть). Данные об уровне засыпи, матрица распределения, результаты анализа загруженных материалов и химикалий, а также результаты гранулометрического анализа сведены воедино, предоставляя информацию о послойной структуре и радиальном распределении химических и физических свойств загруженного материала в печи.

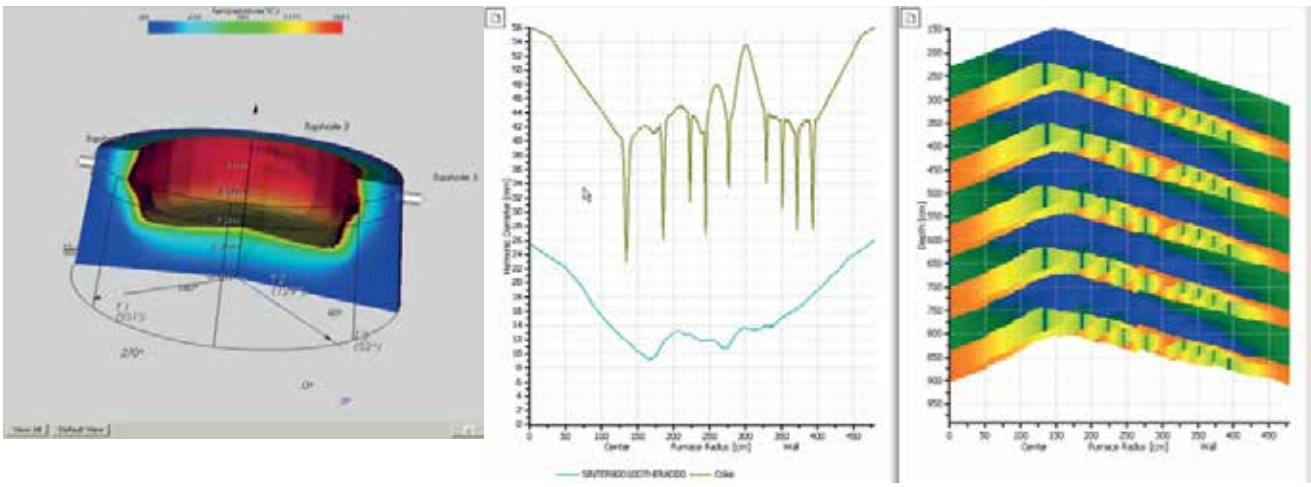


Рис. 1. Данные для информации: 3D-модель износа пода и усовершенствованная модель распределения шихты

Поднимаясь на пирамиду знаний

Пирамида знания, связанная с процессом управления, показана на рис. 2:

1. Доменная печь и ее агрегаты отображаются на схеме посредством множества измерений, сведенных в огромный набор *цифровых данных*.
2. Эти данные содержат *информацию*, которая либо сразу ясна, либо которую можно получить с помощью моделей системы оптимизации процесса.

3. Информация от системы оптимизации процесса, как и информация из других источников, может быть использована персоналом доменной печи для создания *ноу-хау* (*know-how*). Если только в компании руководством не введены специальные организационные меры, как правило, ноу-хау нарабатываются отдельными специалистами индивидуально. Такие индивидуальные ноу-хау хранятся в мозгах различных операторов, технологов и специалистов. Контроль знаний, наработка и сохранение ноу-хау — за это во всех компаниях идет постоянная борьба, в частности, в стареющих обществах и в отраслях промышленности, которые кажутся не особо привлекательными для потенциальных заказчиков, что, по крайней мере, в отдельных странах бросает серьезный вызов черной металлургии. При очередном увольнении сотрудников ноу-хау теряется — иногда это весьма значимые ноу-хау. Чтобы справиться с этой проблемой, предприятия разрабатывают учебные программы, методики обмена знаниями и структурируют информацию в виде рабочих инструкций, публикаций, таблиц и т.п., т.е. ноу-хау оформляется в текстовой форме, выходя уже за пределы знаний одного отдельного опытного специалиста.
4. Конечная мотивация для создания такой структурированной информации заключается в формировании базы для принятия решений для практических действий, поэтому мы придумали для нее обобщающий термин *правила действий* (*action rule*). Одним из важнейших примеров такой оформленной информации являются рабочие инструкции: в рабочих инструкциях, которые обычно представляют собой печатный документ, дается перечень стандартизованных правил для действий в четко определенных ситуациях. Целью таких документов является формирование определенных «ноу-хау общего пользования» и практики стандартных операций. Несмотря на то, что в рабочих инструкциях обычно содержится огромное количество ноу-хау, определяющих действия, которые следует выполнить в определенных случаях и/или в определенных ситуациях, обычно они все же не дотягивают до уровня полностью стандартной операции:
   - индивидуальные требуемые правила заранее не отбираются в соответствии с текущей ситуацией, что может перегружать операторов в конкретной критической ситуации;
   - сами правила оставляют некоторое пространство для индивидуальной трактовки и выбора действий.
5. Мы хотели бы привлечь внимание к тому, что системы автоматизации непосредственно отражают знания, связанные с рабочими операциями. В связи с этим такое четкое определение, как *прозрачный алгоритм управления и контроля* (*transparent control algorithm*), можно считать отличным выражением процесса управления знанием. Хотя это может казаться совершенно очевидным в случае правил в экспертной системе, основанной на базе этих правил, это также относится и к control loops, а также к комплексам четко сформулированных действий управления и контроля и моделирующих расчетов.

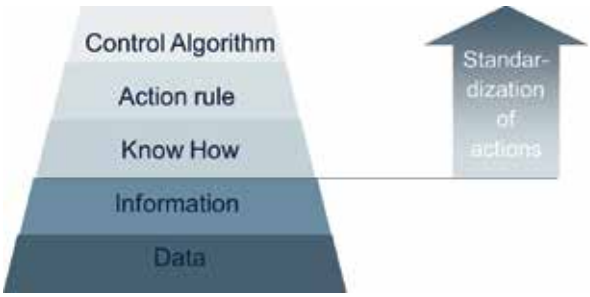


Рис. 2. Пирамида знания: система автоматизации — система управления знанием

Получение новой информации, знаний и правил за счет анализа скрытых закономерностей в данных

В дополнение к тому, что информация, получаемая операторам из ЧМИ, связанных с различными моделями, и из различных отчетов, базы данных, характеризуются тенденцией к захоронению огромного количества этих данных, поскольку раз обобщив их в себе, более не дают возможности

их анализировать. Однако потенциальные схемы взаимодействия и взаимозависимости между этими данными можно исследовать с помощью специальных инструментов, так система VAiron предоставляет возможность для удобного доступа к таким данным и анализа скрытых взаимозависимостей и факторов их воздействия методами, применяемыми в аналитике больших объемов данных. Эта информация может быть использована в качестве основы для выработки новых операционных стратегий и совершенствования, расширения (или упрощения!) комплекса контрольных действий.

Цифровизация знания

Активная оцифровка и преобразование знаний в формат автоматизированной системы (см. рис. 3, верхняя часть) все еще остаются большой проблемой. Во время внедрения экспертной системы VAiron сбор и предоставление знаний в нужной форме — одна из наиболее важных задач. На этом этапе индивидуальные ноу-хау от различных операторов и инженеров-технологов собираются и вырабатывается единый операционный подход. Хотя данный процесс может быть весьма трудоемким и утомительным, наградой за труд служит создание индивидуальной базы знаний, отражающей операционную философию для соответствующего завода. Как правило, выявляются различные взгляды на оптимальный подход к управлению со стороны различных опытных специалистов завода, что вызывает весьма плодотворные дискуссии, которые уже представляют собственную ценность.

По нашему опыту, весьма важным фактором успеха является непрерывное совершенствование базы знаний. Экспертная система должна использоваться в качестве инструмента для управления знаниями, а не инструментом для статичного накопления правил.

Выработка новых знаний и правил на основе данных уже подробно рассмотрена выше. В дополнение следует отметить, что имеется возможность непосредственной настройки, модификации и накопления базы правил за счет различных алгоритмов машинного обучения. Однако инкорпорирование таких методов в процесс принятия решений системы управления и контроля является весьма деликатным, хотя адаптивные методы уже были успешно внедрены в большом количестве различных прикладных программ. Здесь всегда остается риск того, что система обучится «нежелательному» поведению и в самый неожиданный момент совершит критические контрольные действия. Поэтому мы следуем весьма осторожному подходу при инкорпорировании таких методов в наши оптимизационные решения.

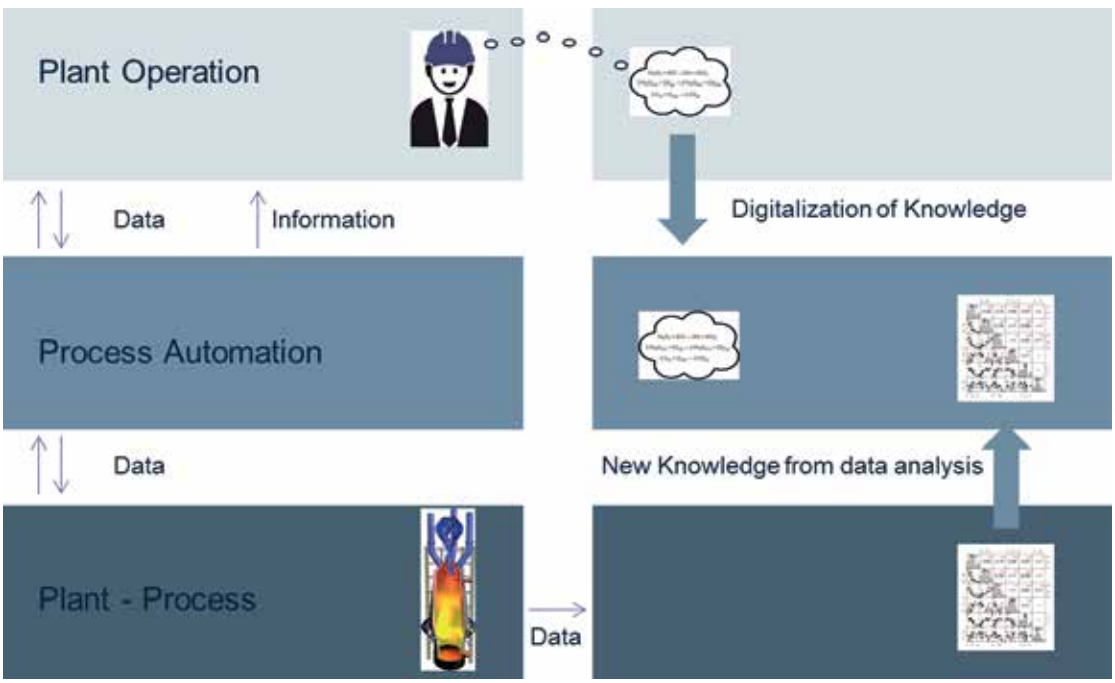


Рис. 3. Поток данных и знаний в современной системе автоматики

3. УПРАВЛЕНИЕ ЗНАНИЯМИ С ПОМОЩЬЮ САМОРЕГУЛИРУЮЩЕЙСЯ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ VAIRON

Гибкая база знаний экспертной системы VAiron — современной системы поддержки принятия решений на основе правил [5] — предназначена играть ключевую роль в управлении знаниями. *В систему инкорпорированы в дополнение к стандартному пакету диагностические, контрольные и корректирующие действия*, специально разработанные для завода в тесном взаимодействии специалистов компании Primetals и Voestalpine Stahl Linz. При внедрении экспертной системы заказчик подробно разъясняет философию работы доменной печи, далее следует определение набора диагностических, контрольных и корректирующих действий, которые следует взять из стандартного пакета, и новых аналогичных действий, но уже разработанных специально для данного завода, для их введения. Для типового доменного проекта такое *совещание по обмену ноу-хау* длится несколько недель. Экспертная система играет ключевую роль в процессе управления знаниями на заводе с доменными печами следующим образом:

- *операционные знания четко структурированы и определены в компьютеризованной системе;*
- *обучение на основе рекомендаций экспертной системы;* т.е. новый обслуживающий персонал имеет возможность эффективно и подробно изучить процесс и уяснить положения руководств, специально разработанных для данного завода, и предыдущую практику работы.

Оператор может принять или отклонить предлагаемый вариант в любой момент в течение заранее определенного, конфигурируемого периода времени, в случае отклонения он будет вынужден пользовательским интерфейсом ввести причину этого, которая может быть использована для оптимизации экспертной системы в автономном режиме.

Рис. 4. Совершенствование базы знаний на основе отзывов и мнений операторов

Таким образом, экспертная система гарантирует независимую от смены устойчивую работу печи, что весьма выгодно, особенно вследствие длительного времени полного процесса и еще более длительного времени для итогового реагирования (пока не завершатся переходные эффекты) доменной печи. За счет корректирующих действий полностью настроенной экспертной системы VAiron, работающей 24x7, достигаются важнейшие улучшения в стабильности и эффективности процесса. Многочисленные примеры внедрения экспертных систем по всему миру показывают, что независимая от смены работа печи значительно повышает стабильность процесса.

Модификация и расширение базы знаний экспертной системы

Экспертная система представляет собой скорее живую систему для работы со знаниями, а не статичный источник знания. Это подразумевает необходимость в инструментах, которые позволят изменять экспертные системы с точки зрения модификации и расширения знаний в них. Экспертная система VAiron поддерживает такие настроечные действия силами инженеров-технологов тремя различными способами:

- изменяя *параметры экспертной системы*;

- используя графический *интерфейс пользователя — редактор правил*;
- используя *построитель модели металлургического процесса* на основе легкого в применении языка программирования, для введения новых корректирующих и диагностирующих действий.

4. УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ С ПОМОЩЬЮ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

Риски в области доменного производства железа

Управление рисками доменного процесса — это постоянная задача, которая заключается в выработке и применении стратегии оценки и снижения этих рисков. Оценка рисков представляет собой как выявление потенциальных рисков, так и оценку их возможного воздействия. А план снижения рисков предназначен для устранения или минимизации воздействия событий или явлений, связанных с фактическим проявлением того или иного риска, если они негативно влияют на процесс. Среди прочих основными рисками, негативно влияющими на процесс доменного производства железа, являются:

- неправильный подбор шихты;
- неправильное распределение компонентов шихты;
- проблемы при остановке и запуске печи;
- потеря контроля над балансом загружаемых-выгружаемых элементов.

Снижение этих рисков и недопущение последствий — это сложный комплексный процесс, т.е. он подразумевает множество шагов, которые необходимо сделать в правильном порядке и в нужное время; он требует множества вводных данных из различных источников, которые нужно вводить через различные интервалы времени, и он требует использования современных моделей расчета баланса тепла и массы. Именно поэтому экспертная система, работающая в режиме саморегулирования — это тот инструмент, который следует выбрать для управления рисками при практическом использовании современных доменных печей.

Таблица 1. Три способа снижения рисков, предоставляемых зрелой системой оптимизации

Точность информации и прогнозирование критических рабочих ситуаций, что ведет к лучшему пониманию/более высокой прозрачности процесса, обеспечивает более высокую степень осведомленности об отклонениях в рабочем процессе и дает больше времени на принятие соответствующих мер, благодаря более раннему указанию на критическую ситуацию	Пример: диагностика экспертной системы, подтверждение правильности данных; модель износа пода печи; модель имитации вала, распределения шихты
Тщательный контроль критических параметров процесса, обеспечивающий стандартность операции с установленными уровнями риска	Пример: энергетическая нагрузка горячей печи, РЭС-термоконтроль (температура выпуска металла и содержание Si)
Автоматизация комплексных рабочих процессов (особенно если они могут привести к критическим последствиям), что исключает потенциальные источники человеческих ошибок за счет использования автоматической последовательности действий	Пример: цифровые помощники, т.е. пакет ПО управления печью при останове и запуске

Контроль шихты

Предназначение модели контроля шихты заключается в формировании такого состава шихты, который бы соответствовал расчетным величинам для кокса и вдуваемого материала, основности шлака, качеству горячего металла и удельным характеристикам шихты. Взаимодействие модели контроля шихты с инженерами-технологами и операторами, а также с саморегулирующейся экспертной системой является основой стандартизованной работы предприятия.

Подбор распределения шихтовых материалов

Саморегулирующийся контроль распределения шихты — уникальный пакет экспертной системы VAiron компании Primetals для стабилизации процесса и снижения расхода топлива, предназначенный для снижения риска использования неблагоприятных вариантов распределения шихты в доменных печах.

Подтверждение правильности данных

В дополнение к классическому подтверждению правильности данных по допуску или на основе трендов также выполняются проверки данных на основе баланса. Если одни и те же измеренные величины (т.е. данные по сырью, данные по дутью и вдуваемым веществам, данные о продукте и попутном продукте, а также данные о процессе) неоднократно идентифицированы в качестве наиболее вероятных ошибок измерения и отклонений от баланса, система подает сигнал тревоги обслуживающему инженеру, чтобы он запланировал необходимые проверки.

Помощь при останове и запуске печи

Пакет поддержки останова и запуска печи полностью интегрирован в экспертную систему и предназначен для минимизации риска останова печи при использовании неверных рабочих процедур, дополнительно к этому он направляет оператора при запуске печи за счет выбора правильных мер для безопасного повышения производительности при соответствующем темпе.

В зависимости от запланированной длительности останова печи, как правило, выполняется различный комплекс действий перед остановом и после него. С помощью пакета поддержки останова и запуска печи инженер-доменщик может определять различные схемы действий для останова с различной длительностью.

Контроль отклонений баланса загружаемых-выгружаемых элементов

Чтобы обнаружить риск значительного накопления определенных элементов на ранней стадии, необходимо пристально следить за балансом элементов. Экспертная система циклически проверяет кратковременные и среднесрочные балансы массы и визуализирует результаты соответствующей диагностики. Такое визуальное отображение напоминает огни светофора, где на оси *y* показываются нормальные (зеленые) зоны, опасный (желтый) диапазон и аварийные (красные) зоны (Рис. 5).

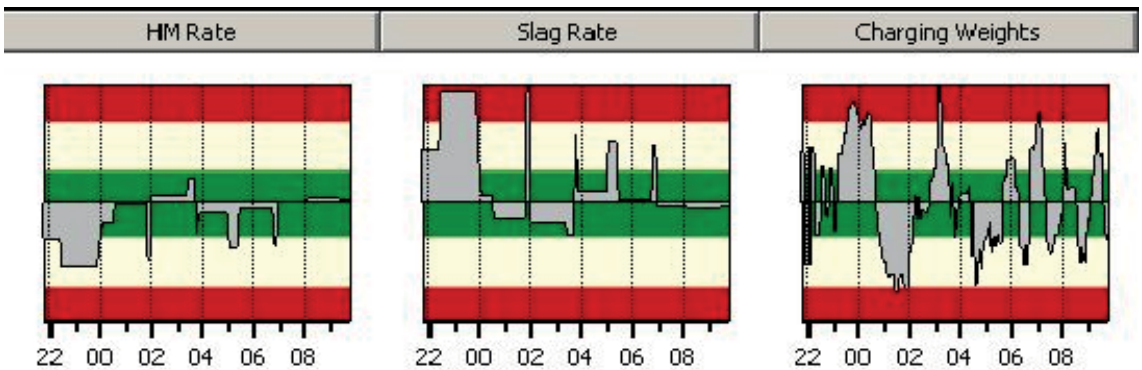


Рис. 5. Визуализация отдельных результатов диагностики экспертной системы в виде сигналов светофора

5. ПРЕИМУЩЕСТВА

Преимущества системы оптимизации процесса можно в целом разделить на три группы:

1. Обобщающее определение *правил действий в базе знаний* экспертной системы ведет к независимой от смены работе. Это гарантирует на практике стандартизованную работу всех смен. Стандартизованная работа автоматически не подразумевает оптимальную работу, однако работа, которая не стандартизована, определенно не может быть оптимизирована.

2. Улучшенный *анализ информации, спрятанной в данных процесса*, ведет к лучшему пониманию *условий текущего процесса*, а также *четкому определению результатов действий*. Благодаря четко определенному *управлению уровнем рисков* появляется возможность подойти ближе к грани *процесса оптимизации*.
3. Объединенная база данных служит надежным инструментом для сбора, адаптации и расширения операционных знаний в правилах действий.

Основная разница между ручной операцией и операцией под контролем экспертной системы заключается в том, что последняя характеризуется более частыми, но меньшими контрольными действиями. В результате надежная бесперебойная работа, не требующая тяжелых контрольных действий и исключающая критические ситуации, обеспечивает:

- расширенный период использования оборудования доменной печи;
- более длительный срок службы оборудования;
- меньший объем технического обслуживания и снижение расходов.

Результаты работы печи с использованием саморегулирующейся экспертной системы

В дополнение к долгосрочным преимуществам, указанным выше, экспертная система доменной печи VAiron дает и немедленный выигрыш, при котором система начинает оправдывать инвестиционные затраты прямо с первого дня эксплуатации:

- снижение удельного расхода топлива и, следовательно, снижение выбросов;
- повышенная производительность доменной печи;
- стабильное качество горячего металла, даже если используются более дешевое низкокачественное сырье.

Операторы стремятся использовать печь с температурой горячего металла, превышающей установленную, что обеспечивает им большую безопасность в случае проблем. При этом тратятся ценные кокс и/или вспомогательное топливо. Саморегулирующаяся экспертная система позволяет использовать печь на определенном уровне риска близком к предельному, в результате топливо сохраняется, а безопасность все равно остается на высоком уровне.

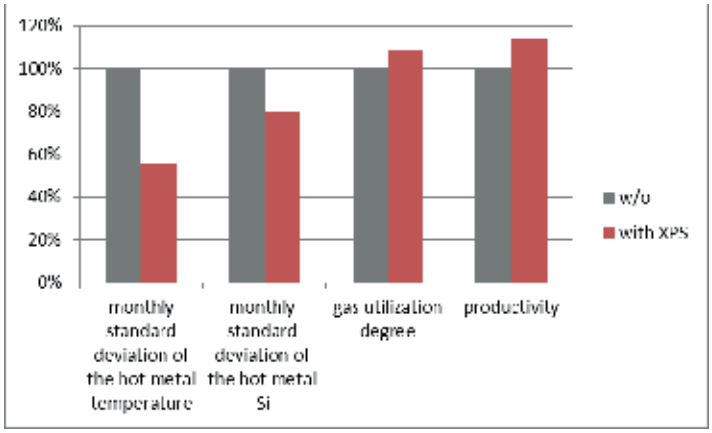


Рис. 6. Месячные ключевые показатели результативности и влияние на них стандартизованной работы экспертной системы VAiron

На рисунке 6 показано положительное влияние стандартизированной работы на месячные ключевые показатели результативности процесса. Экспертная система уменьшает стандартное отклонение температуры горячего металла и содержание Si в горячем металле, при этом повышая степень использования газа и производительность доменной печи.

Типовое сокращение расхода топлива составляет от 5 до 15 кг коксового эквивалента на тонну горячего металла. Уже имеется подробный анализ экономии, полученной с помощью экспертной системы VAiron в предыдущих проектах, с учетом различных габаритов доменных печей и степени расхода коксового эквивалента [8].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Рассмотрены некоторые из многочисленных аспектов цифровизации с упором на генерирование информации, а в конечном итоге ноу-хау на основе данных. Продемонстрированы цифровизация и переформатирование ноу-хау в формат систем оптимизации процесса, включая новые методики редактирования и пополнения правил действий. Такие стандартизованные наборы правил обеспечивают унифицированные действия при контроле доменных печей, а в итоге — бесперебойный производственный процесс.

Показано каким образом системы оптимизации процесса вносят свой вклад в достойный ответ на растущий ценовой прессинг за счет постоянного совершенствования ноу-хау с учетом операционной практики и путем поддержания установленных границ рисков.

Опираясь на последние исследования, мы ожидаем, что прогресс в области контрольно-измерительной аппаратуры, аналитики данных, машинного обучения и моделирования вызовет дальнейшее совершенствование и в области систем оптимизации сложного технологического процесса доменных печей.

Список литературы

1. Публикации в Интернете по адресу: https://www.quora.com/Who-should-get-credit-for-the-quote-data-is-the-new-oil
2. T. Kronberger, M. Schaler, B. Schürz, K. Stohl Expert Systems Controlling the Ironmaking Process in Closed Loop Operation in Expert Systems, InTech, ISBN 978-953-307-032-2, Vukovar, Croatia, 2010.
   Т. Кронбергер, М. Шалер, Б. Щурц, К. Штоль; Экспертные системы контроля процесса производства чугуна в саморугулирующихся экспертных системах, InTech, ISBN 978-953-307-032-2, Вуковар, Хорватия, 2010 г.
3. O. Lingiardi, G. Cegna, G. Tomassini, C. Quispe, E. Frank, M. Schaler, B. Schürz High Efficiency Blast Furnace Operation with the Process Optimization System, AISTech 2014 Proceedings — Volume I, Indianapolis, 2014.
   О. Лингиарди, Г. Сегна, Г. Томассини, С. Куиспе, Е. Франк, М. Шалер, Б. Щурц. Высокоэффективная работа доменной печи с применением системы оптимизации процесса, AISTech, 2014 г. Сборник научных трудов — том I, Индианополис, 2014 г.
4. Maarten Geerdes, Rénard Chaigneau, Ivan Kurunov, Oscar Lingiardi, John Ricketts Modern Blast Furnace Ironmaking — an introduction — Third Edition, 2015.
   Мартен Гердес, Ренард Чайгно, Иван Курунов, Оскар Лингиарди, Джон Рикеттс; Современный процесс доменного производства чугуна — введение — 3-е издание, 2015 г.
5. Martin Schaler, VAiron Blast Furnace Process Optimization — 25 Years of Experience with Closed-Loop Expert Systems, AISTech proceedings, 2016.
   Мартин Шалер, Система оптимизации процесса доменных печей — 25-летний опыт использования саморегулирующихся экспертных систем, AISTech, сборник научных трудов, 2016 г.

Н.А. Спирин, В.В. Лавров, О.П. Онорин, ФГАОУ ВПО «УрФУ»
В.Ю. Рыболовлев, Д.А. Шнайдер, А.В. Краснобаев,
ПАО «ММК»

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩИХ СИСТЕМ В ПИРОМЕТАЛЛУРГИИ (НА ПРИМЕРЕ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА)

Сегодня многие ведущие металлургические компании России объявили о реализации концепции «Индустрия 4.0». Что подразумевает под собой данный термин?

Единого определения данного понятия на сегодняшний день найти невозможно. Различные источники предлагают разное наполнение данного термина. Поэтому понятие «Индустрия 4.0» носит, скорее, собирательный образ, практическое наполнение которого зависит от масштабов предприятия, его технических и финансовых возможностей, от понимания и готовности менеджмента компании реализовывать задачи, которые, как правило, относят к данному понятию.

Предприятие, подписавшееся на реализацию концепции «Индустрия 4.0» с точки зрения автоматизации, должно сменить подходы к проектированию и реализации информационных систем. По сути, при проектировании и реализации системы речь должна идти о создании «цифрового двойника» объекта и бизнес-процессов, а система автоматизации должна рассматриваться как часть единого информационного пространства предприятия.

Такой подход позволит со временем создать единую информационную основу для реализации комплекса задач, направленных на оптимизацию и повышение эффективности работы как отдельных агрегатов, цехов, производств, так и предприятия в целом.

Одним из направлений «Индустрии 4.0», основанным на работе с «Большими Данными», является создание интеллектуальных систем, управляющих технологическим процессом агрегата в режиме реального времени. Интеллектуальные системы должны стать квалифицированным помощником в принятии решений, связанных с автоматизиро-

ванным управлением технологическим процессом, а на некоторых агрегатах или участках полностью заменить человека.

Стоит отметить, что начавшаяся еще в конце 1970-х годов «компьютерная эйфория», сводящая сложную проблему математического моделирования технологических процессов и синтеза систем управления лишь к вычислительной мощности ЭВМ, полностью себя исчерпала. Этим, вообще говоря, во многом и завершился формально-математический этап развития теории моделирования и управления и начинается этап развития физической теории моделирования и управления [1]. Несмотря на информатизацию, развитие вычислительной математики и алгоритмов идентификации, банки сертифицированных (верифицированных) математических моделей технологических процессов в пирометаллургии остаются слабо заполненными. Это связано с большими интеллектуальными и временными затратами на создание адекватных математических моделей сложных процессов и систем в металлургии. Для новых процессов и технологий и систем высокой сложности это создает большие трудности, так как эти процессы и системы, как правило, не могут функционировать без управления, а математическая модель часто не может быть идентифицирована и сертифицирована без реально функционирующей системы.

Следует отметить особую роль математических моделей. Известный русский академик А.Н. Крылов в 1937 г. еще в период зарождения вычислительной техники и информатики предупреждал: «что если в вычислительное устройство загрузить информационный мусор, то на выходе вычислителя получим также мусор». Последующий опыт показывает, что только использование адекватных моделей разного класса (математических моделей технологических процессов, моделей знаний, моделей данных и т. п.) может обеспечить успешность и эффективность функционирования информационных систем. Интеллектуальным ядром такой переработки информации являются математические модели технологических процессов. Заметим, что математическое содержание проблемы управления в трудах крупных математиков получило существенное развитие. В то же время академик РАН А.А. Красовский совершенно справедливо отмечал: «… в развитии современной теории управления с точки зрения практики далеко не все обстоит благополучно. Классическую теорию автоматического управления в основном создавали инженеры для инженеров. Современную теорию управления создают в основном математики для инженеров и во все большей мере математики для математиков» [2]. Последнее с точки зрения практики вызывает определенное беспокойство. Главное негативное влияние на практическое внедрение методов современной теории управления оказывает масса оторванных от практических потребностей и возможностей работ интересных в математическом отношении, но пока бесплодных в отношении современных приложений. Нельзя отрицать право на существование математической современной теории управления как раздела математики, развивающегося по собственным законам и находящего применение по мере возникновения соответствующих потребностей. Однако такая математическая сторона современной теории управления должна быть достаточно четко выделена по отношению к прикладной ее стороне. Главная проблема заключается в принципиальном игнорировании многими математиками такого фундаментального понятия, как физическая сущность и индивидуальные особенности управляемого объекта [1]. Если на начальном этапе развития классической теории автоматического управления, а в последующем в математической теории оптимального управления, такое абстрагирование от физического содержания, несомненно, было полезным с точки зрения разработки основ теории, то сегодня развитие теории управления требует возврата и учета основополагающих свойств объекта управления, но уже на новом качественном уровне развития современной прикладной теории управления. В современной теории математическое содержание во многом подавляет физическое начало, формальный вычислительный подход не может быть перспективным направлением в развитии прикладной теории управления, несмотря на мощь современной вычислительной техники.

Методологической основой создания моделей технологических процессов являются общая теория систем и системный анализ [3]. При использовании этой методологии модель технологических процессов состоит из математических моделей не только отдельных элементов, но и взаимодействия между элементами и внешней средой, описываемого оператором взаимодействия (взаимосвязи). Каждый элемент математической модели может иметь различную степень детализации математического описания. Важно лишь, чтобы входные и выходные параметры всех элементов модели находились во вза-

имном соответствии, что обеспечит получение замкнутой системы уравнений математической модели процесса в целом. В идеале математическое описание каждого элемента должно включать уравнения, параметрами которых являются только физико-химические свойства веществ. Однако получить такое фундаментальное описание свойств всех элементов, их взаимосвязей и при существующем уровне знаний и исследований некоторых явлений металлургических процессов в настоящее время не всегда представляется возможным. В связи с этим требуется развитие и других подходов для моделирования сложных энергоемких технологических процессов в пирометаллургии.

Оценивая в целом состояние реально функционирующих систем оптимального управления технологическими процессами и их комплексами в металлургии, следует констатировать, что существует внутренняя причина слабого внедрения такого класса систем, особенно для сложных систем. Необходимо объединение современной теории оптимального управления с математическими моделями технологических процессов. Такой подход возвращает теорию управления к естественным источникам ее возникновения, но на новом, естественно-математическом витке ее развития [4].

Проиллюстрируем эти положения на примере доменного процесса. В истории науки и техники отечественные ученые-доменщики оказались пионерами в создании систем автоматического управления технологическими процессами. Работы по формализации методов управления тепловым режимом доменной плавки, начатые в СССР профессорами В.Н. Андроновым, Н.Н. Бабарыкиным, В.И. Большаковым, А.А. Гиммельфарбом, А.Д. Готлибом, Б.И. Китаевым, М.А. Павловым, А.Н. Похвисневым, А.Н. Раммом, В.А. Сорокиным, М.А. Стефановичем, С.В. Шавриным и многими другими, обеспечили в свое время приоритет в мировой науке и практике. В то же время надежды, связанные с тем, что удастся дать полное математическое описание доменного процесса, не оправдались. Современный уровень математического описания явлений в доменной печи не позволяет вскрыть все тонкости доменного процесса [5–10].

Составление и решение системы дифференциальных уравнений, описывающих закономерности тепло- и массообмена с учетом кинетики протекающих в объеме печи химических реакций, лежат в основе кинетических моделей доменного процесса [11–13]. Как показывает практика, кинетические модели позволяют решать определенный круг практических задач: получать температурные и концентрационные поля доменной печи при плавке специальных чугунов, вдувании горячих восстановительных газов; оценивать влияние на показатели работы печи таких параметров плавки, как восстановимость, степень металлизации железорудных материалов, реакционная способность кокса; определять общие закономерности динамических характеристик печи по различным каналам. В ряде случаев кинетические модели обогащаются моделями газодинамики, что расширяет область их применимости [11, 12]. При условиях значительного расширения методов численного моделирования и дальнейшего исследования доменного процесса в перспективе появятся реальные предпосылки для использования полных аналитических кинетико-математических моделей доменного процесса с бóльшими возможностями.

В то же время сегодня существуют проблемы при создании и использовании кинетических моделей этого класса, которые сводятся к следующим [14]:

— отсутствие достаточных данных для достоверного описания процессов, протекающих в нижней части печи. Так, нет надежных данных о зависимости скоростей восстановления железа и кремния от температуры, состава шлака и кокса, о коэффициентах теплоотдачи между газом, коксом и жидкими продуктами плавки, не поддается полному математическому описанию продолжительность пребывания чугуна и шлака между горизонтами перехода в жидкое состояние и уровнем фурм;
— проблематичность учета влияния неравномерности распределения компонентов шихты и газа, фракционного состава шихты на ход процессов теплообмена, восстановления окислов, газификации углерода и др.;
— обязательность введения существенных допущений, положенных в основу моделей этого класса, обусловленных необходимостью предварительного определения кинетических характеристик железорудного сырья и соответствующей параметрической настройки модели для конкретных условий доменной плавки, ограничивают их практическую применимость для решения задач текущего анализа, прогноза и управления ходом плавки;

— недостаточная изученность и сложность описания движения шихтовых материалов, расплава в доменной печи.

Данные обстоятельства не позволяют устранить основное противоречие в разработке математических моделей, а именно: увеличение сложности модели, числа учитываемых факторов не приводит к повышению надежности результатов моделирования. В силу изложенного, можно согласиться с выводом проф. И.Г. Товаровского «…прогноз показателей плавки и оценки хода основных процессов в печи могут эффективно выполняться на основе простых зависимостей для процессов тепло-массообмена и газодинамики, совмещенных с балансовыми уравнениями, основанными на зональном рассмотрении процесса. Эти зависимости легко контролируются известными данными практики» [8]. При этом найдет применение натурная информация о работе доменной печи, появится возможность адаптации модели в темпе с процессом, а результаты моделирования можно будет легко контролировать по фактическим (натурным) данным. Использование отдельных статистических зависимостей (например, зависимостей степени прямого восстановления железа от расхода восстановителей, степени использования оксида углерода от расхода топлива и другие) в балансовых методах по расчету расхода кокса положило начало развитию балансово-статистических методов доменного процесса. К ним относятся методы А.Н. Рамма, А.В. Ченцова и др. [6, 14]. Для решения широкого класса задач в области анализа и прогнозирования доменной плавки, в частности, определения расхода кокса, производительности печи и других показателей доменной плавки в настоящее время эффективно используются материально–тепловые балансы и балансово-статистические методы. Подчеркнем дополнительно, что одна из главных проблем математического моделирования доменного процесса связана с разрешением противоречий между сложностью моделируемого процесса и необходимостью решения технологических задач в одном темпе с процессом за заданный интервал времени с использованием реально имеющейся информации. Как показывает практика, с помощью полных моделей доменного процесса решить эту проблему не удается. Определение конечных результатов доменной плавки с использованием прогнозных моделей этого класса дает не бóльшую достоверность, чем некоторые балансовые модели.

В основу модели теплового состояния современной доменной плавки положены закономерности теплообмена, разработанные Б.И. Китаевым и развитые его учениками [7]. Перспективным для решения рассматриваемых задач оказался натурно-математический подход, разработанный в Сибирском индустриальном университете [15, 16]. Применительно к доменному процессу этот подход использован Б.И. Китаевым и его учениками [17]. Такой подход предусматривает выделение двух моделей: базового состояния и прогнозирующий. Модель базового состояния по натурным данным о параметрах и показателях работы печи позволяет оценивать показатели состояния системы и использовать их для расчета коэффициентов настройки (адаптации) прогнозирующего блока модели. Прогнозирующая модель способна оценивать проектные показатели доменного процесса при изменении условий плавки относительно текущего состояния. Выполненными ими исследованиями установлено, что модель теплового состояния доменной печи в целом пригодна для решения задач контроля и анализа теплового режима этого агрегата. Однако были выявлены и недостатки: особенности дутьевого, газодинамического и шлакового режимов, неравномерность распределения материалов и газов не находили должного отражения в этой модели, что ограничивало область ее практического применения. Использование методологии системных исследований, последующее совершенствование модели доменного процесса путем учета особенностей газодинамического, дутьевого и шлакового режимов, реально доступной информации о работе доменной печи, неравномерности распределения материалов и газов значительно расширило возможности этой модели. Разработка программного обеспечения с использованием современных технологий позволяет решать комплекс технологических задач по управлению доменной плавкой [18, 19]. Следует особо отметить, что при разработке моделей этих подсистем, параметрической идентификации широко использовались достижения других ведущих отечественных научных школ в области исследования и математического моделирования доменного процесса, а также хорошо проверенные практикой эмпирические уравнения. Однако основой моделей этих подсистем остаются фундаментальные, физические представления о процессах доменной плавки.

Для контроля ряда технологических параметров широко используется типовая, стандартная аппаратура отечественного и импортного производства.

Хотя за последнее десятилетие в отечественном и зарубежном доменном производстве опробованы ряд специальных средств измерения технологических параметров, не применявшихся ранее, вопросы обеспечения достоверности первичных данных в системах контроля распределения материалов и газов, непрерывного контроля состава и физических свойств шихтовых материалов, загружаемых в печь, жидких продуктов плавки на выпусках, контроля положения и формы зоны вязкопластичного состояния материалов и др. остаются открытыми.

Недостаточный уровень контроля важнейших параметров доменной плавки снижает эффективность работы систем моделирования, а разработка соответствующих датчиков и измерительных систем является сегодня одной из первоочередных задач.

Практика эксплуатации систем уровня АСУ ТП, использующих моделирование, показала целесообразность разработки и внедрения помехозащищенных математических моделей, которые ориентированы на надежные технические средства измерения и контроля. В связи с этим, требуют усовершенствования системы оценки достоверности получаемой информации, а также возможность проверки результатов расчетов и теоретических предположений в темпе с процессом. Следует отметить, что формальное использование современных математических методов фильтрации и оценки достоверности информации для сложных металлургических процессов не всегда дает ожидаемые результаты. Одним из перспективных и эффективных методов построения помехозащищенных моделей применительно к доменному процессу разработан проф., д.т.н. С.А. Загайновым и доц., к.т.н. Л.Ю. Гилевой [17, 19]. Он заключается в выборе такой структуры модели, в которой наименее достоверные данные используются таким образом, чтобы ошибки, вызванные этими данными, не приводили к существенным погрешностям результатом моделирования. В этом случае используется модель процесса с переменной структурой и учитываются не только взаимосвязи, присущие различным физико-химическим процессам, но и информационная структура управляемой технологической системы. При этом производится оценка достоверности исходных данных по комплексным параметрам, характеризующими тепловые, газодинамические и восстановительные процессы. Такой подход позволяет рассчитывать производительность, состав шлака, показатели теплового, газодинамического и шлакового режимов и др., используя различные блоки наиболее достоверных исходных данных.

Анализ современного состояния управления доменной плавкой позволяет сделать вывод о том, что следует сосредоточиться на решении научной проблемы повышения эффективности доменной плавки на основе разработки динамической подсистемы поддержки принятия решений, создании совокупности алгоритмов модельной системы поддержки принятия решений, позволяющих количественно оценивать ход доменной плавки и распознавать виды и вероятность отклонения плавки от нормального режима. В связи с этим в порядке объективности следует отметить, что в последние десятилетия активно разрабатываются и новые подходы к оценке состояния и управлению плохо структурированными технологическими процессами: экспертные системы, системы распознавания образов. Целесообразность использования этих методов обусловлена: во-первых, исключительной сложностью явлений, свойственных доменному процессу; во-вторых, существенным развитием теории моделирования знаний; в-третьих, созданием мощных баз данных реального времени технологических параметров.

При этом перспективным направлением следует считать интеграцию опыта инженерно-технологического персонала по управлению доменной плавкой и методов математического моделирования, в основу которых положены фундаментальные физические представления о процессах доменной плавки. Подсистема диагностики состояния и отклонений хода доменной плавки от нормального режима в режиме реального времени отслеживает показатели доменной плавки и на их основе в численном выражении указывает на возможное наличие отклонения от нормального режима. В случае обнаружения такого отклонения подсистема определяет его вид и вероятность возникновения [20–22].

Концепция «Индустрия 4.0» предусматривает существенное развитие алгоритмического и программного обеспечения для решения комплекса технологических задач не только на отдельных доменных печах, но и для MES-уровня (Manufacturing Execution Systems — системы управления технологией исполнения доменного производства) современных автоматизированных информационных систем крупнейших металлургических предприятий России. Следует отметить, что в целом анализ состояния вопроса по реально используемым математическим моделям в практике технологии ведения доменной

плавки показывает: в настоящее время разрыв между потенциальными возможностями средств автоматизации и реальными возможностями используемого программного обеспечения огромен. В ближайшие годы предстоит решение актуальной научно-практической проблемы по созданию автоматизированной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха на основе разработки и применения новых методов и алгоритмов, позволяющей оценивать показатели работы доменных печей за любой требуемый период, а также прогнозирования работы доменных печей и цеха в целом при изменении технологических режимов. При постановке и решении требуется не только изучение характеристик, описывающих влияние изменений условий плавки на технико-экономические показатели работы отдельных печей, но и выполнение детального анализа для математического описания как внешних, так и внутренних ограничений В итоге требуется создание сложной экономико-математической модели и программного обеспечения по оптимальному управлению технологии доменного цеха. На ПАО ММК для решения этих задач разрабатывается автоматизированной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха разрабатываются и реализуются [23–25]:

- подсистема формирования и сопоставления отчётных показателей работы доменного цеха, расчета материальных балансов, балансов отдельных элементов, позволяющая оперативно получать достоверную информацию для осуществления функций контроля и сравнения отчётных показателей работы доменных печей и цеха в целом в различные временные периоды;
- подсистема анализа и прогнозирования теплового режима доменной плавки, включающая блоки расчета теплового баланса, комплекса показателей тепловых режимов, расхода кокса в базовом и проектном периодах работы доменных печей в случае планируемого изменения видов и свойств железорудного сырья, флюсов, дутьевых параметров, состава жидких продуктов плавки;
- подсистема анализа и прогнозирования шлакового режима доменной плавки, включающая блоки расчета состава и свойств конечного шлака в базовом и проектном периодах работы доменных печей в случае планируемого изменения видов и свойств железорудного сырья, флюсов, дутьевых параметров, состава жидких продуктов плавки;
- подсистема анализа и прогнозирования газодинамического режима доменной плавки, в базовом и проектном периодах работы доменных печей при планируемых изменений видов и свойств железорудного сырья, дутьевых и других параметров;
- подсистема выбора оптимального состава доменной шихты, позволяющая с учётом заданных технологических ограничений на шлаковый, газодинамический и тепловой режимы доменных печей определять необходимое соотношение шихтовых материалов, расход флюсов и состав агломерата для обеспечения его заданной основности;
- подсистема оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов, позволяющая прогнозировать оптимальные значения расходов природного газа и технологического кислорода на каждую из печей при изменении объема выделенных цеху ресурсов, при остановке одной или нескольких печей, при изменении режимных параметров работы отдельных доменных печей и при других технологических ситуациях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Одним из направлений «Индустрии 4.0», основанным на работе с «Большими Данными», является создание интеллектуальных систем управления технологическим процессом агрегата в металлургии в режиме реального времени. При этом моделирование систем управления становится основополагающей частью этого процесса.
2. Сегодня становится очевидной роль алгоритмов и компьютерных программ для решения комплекса технологических задач в области доменного производства.
3. Анализ в целом состояния вопроса по реально используемым математическим моделям в практике показывает: в настоящее время разрыв между потенциальными возможностями средств автоматизации и реальными возможностями используемого программного обеспечения огромен.

4. В связи с этим следует выделить научные проблемы, первостепенными из которых являются:
   — совершенствование существующих и разработка новых компьютерных методов получения и оценки достоверности информации о состоянии технологического процесса;
   — использование современных достижений в области математического моделирования, моделирования знаний, теории и практики современной металлургии, теории управления при разработке автоматизированных систем управления;
   — разработка на основе современных принципов соответствующего математического, алгоритмического и программного обеспечения.
5. Решение этих проблем возможно только при интеграции интеллектуальных ресурсов университетов, научно-исследовательских и проектных институтов, специалистов-технологов и финансовых средств ведущих металлургических компаний России.

Список литературы

1. Колесников А.А. Современная прикладная теория управления: под ред. А.А. Колесникова. — Таганрог: изд. ТРТУ, 2000. Ч. 1 — 400 с., Ч. 2 — 559 с., Ч. 3 — 656 с.
2. Справочник про теории автоматического управления: под ред. А.А. Красовского. — М.: Наука, 1987. — 712 с.
3. Введение в системный анализ теплофизических процессов металлургии / Н.А. Спирин, В.С. Швыдкий, В.И. Лобанов, В.В. Лавров. — Екатеринбург: УГТУ, 1999. — 205 с.
4. Салихов З.Г. Системы оптимального управления сложными технологическими объектами: монография / З.Г. Салихов, Г.Г. Арунянц, Л.А. Рутковский. М.: Теплоэнергетик, 2004. 496 с.
5. Юсфин Ю.С. Металлургия чугуна; под ред. Ю.С. Юсфина. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. — 774 с.
6. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. — М.: Металлургия, 1980. — 304 с.
7. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Д. Теплообмен в доменной печи. — М.: Металлургия, 1966. — 355 с.
8. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Монография. 2-е издание. — Днепропетровск: изд. «Пороги», 2009. — 768 с.
9. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. — К.: Наукова думка, 2007. — 411 с.
10. Андронов В.Н. Экстракция черных металлов из природного и техногенного сырья. Доменный процесс. — Донецк: Норд-Пресс, 2009. — 377 с.
11. Доброскок В.А., Кузнецов Н.А., Туманов А.И. Математические модели процессов газодинамики и восстановления в доменной печи // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 3. С. 145–146.
12. Дмитриев А. Н. Математическое моделирование доменного процесса. — Екатеринбург: УрО РАН, 2011. — 162 с.
13. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки / Ю.Н. Овчинников, В.И. Мойкин, Н.А. Спирин, Б.А. Боковиков // Челябинск: Металлургия, 1989. — 120 с.
14. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. — М.: Наука, 1991. — 92 с.
15. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев и др. М.: Издат. объединение «Российские университеты», 2008. — 487 с.
16. Прогнозирование в системах управления / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко. СибГИУ. — Новокузнецк: 2002. — 358 с.
17. Загайнов С.А., Онорин О.П., Гилева Л.Ю. Разработка и внедрение математического и программного обеспечения для гибких технологических режимов работы доменных печей // Сталь. 2000. № 9. С. 12–15.
18. Информационные системы в металлургии // Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов, В.А. Краснобаев, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, В.С. Швыдкий, С.А. Загайнов, О.П. Онорин. — Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. — 617 с.

19. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.Л. Терентьев, Л.Ю. Гилева, В.Ю. Рыболовлев, И.Е. Косаченко, В.В. Лавров, А.В. Терентьев; под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. 301 с.
20. Логические основы распознавания вида отклонения доменной плавки от нормального режима / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, А.В. Павлов, В.В. Лавров, А.С. Истомин, А.В. Павлов, И.А. Гурин // Известия вузов. Черная металлургия. — 2014. — № 8. — С. 42–47.
21. Разработка информационно-логической системы распознавания вида отклонения доменной плавки от нормального режима / А.С. Истомин, Н.А. Спирин, О.П. Онорин, А.В. Павлов, И.А. Гурин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2015. — № 8 (58). — С. 607–611.
22. Особенности переходных процессов доменной плавки / О.П.Онорин, Н.А.Спирин, А.С.Истомин, и др. // Металлург. 2017. № 2. С. 47–51.
23. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, С.И. Паршаков [и др.]. — Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2006. — 307 с.
24. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев [и др.]. Под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. — 558 с.
25. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, А.В. Краснобаев, О.П. Онорин, И.Е. Косаченко. Под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 465 с.

А.В. Павлов, А.А. Полинов, ПАО «ММК»
Н.А. Спирин, О.П. Онорин, В.В. Лавров, И.А. Гурин,
ФГАОУ ВПО «УрФУ»

РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Использование традиционной методологии анализа работы доменных печей и цеха без использования математических моделей доменного процесса в целом отражает результаты работы печей и состояние технологии. Однако использование возможностей модельных систем поддержки принятия решений позволяет научно обоснованно решать комплекс задач в области доменного производства, более квалифицированно выполнять анализ технологии доменной плавки и разрабатывать рекомендации по ее совершенствованию, обеспечивает улучшение технико-экономических показателей работы печей и цеха в целом.

Принятая в опытно-промышленную эксплуатацию модельная система поддержки принятия решений (модель доменного процесса УрФУ–ММК) диагностики работы и прогнозирования технологических ситуаций доменных печей ПАО «ММК», включает в себя следующие основные блоки: расчёт материальных и тепловых балансов, расчет балансов отдельных элементов, моделирование теплового, шлакового и газодинамического режимов работы доменных печей, выбор состава доменной шихты, расчет зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов и прогнозирования технологических ситуаций. Комплекс математических и программных модулей интегрирован в информационную систему металлургического предприятия. Основные расчетные соотношения и примеры реализации этой модели подробно описаны в работах [1–4].

Разработка программных модулей, входящих в комплекс, произведена с учётом требований инженерно-технологического персонала и особенностей использования компьютерных систем поддержки принятия решений в практике работы доменного производства. Основными пользователями АРМа является инженерно-технологический персонал доменного производства.

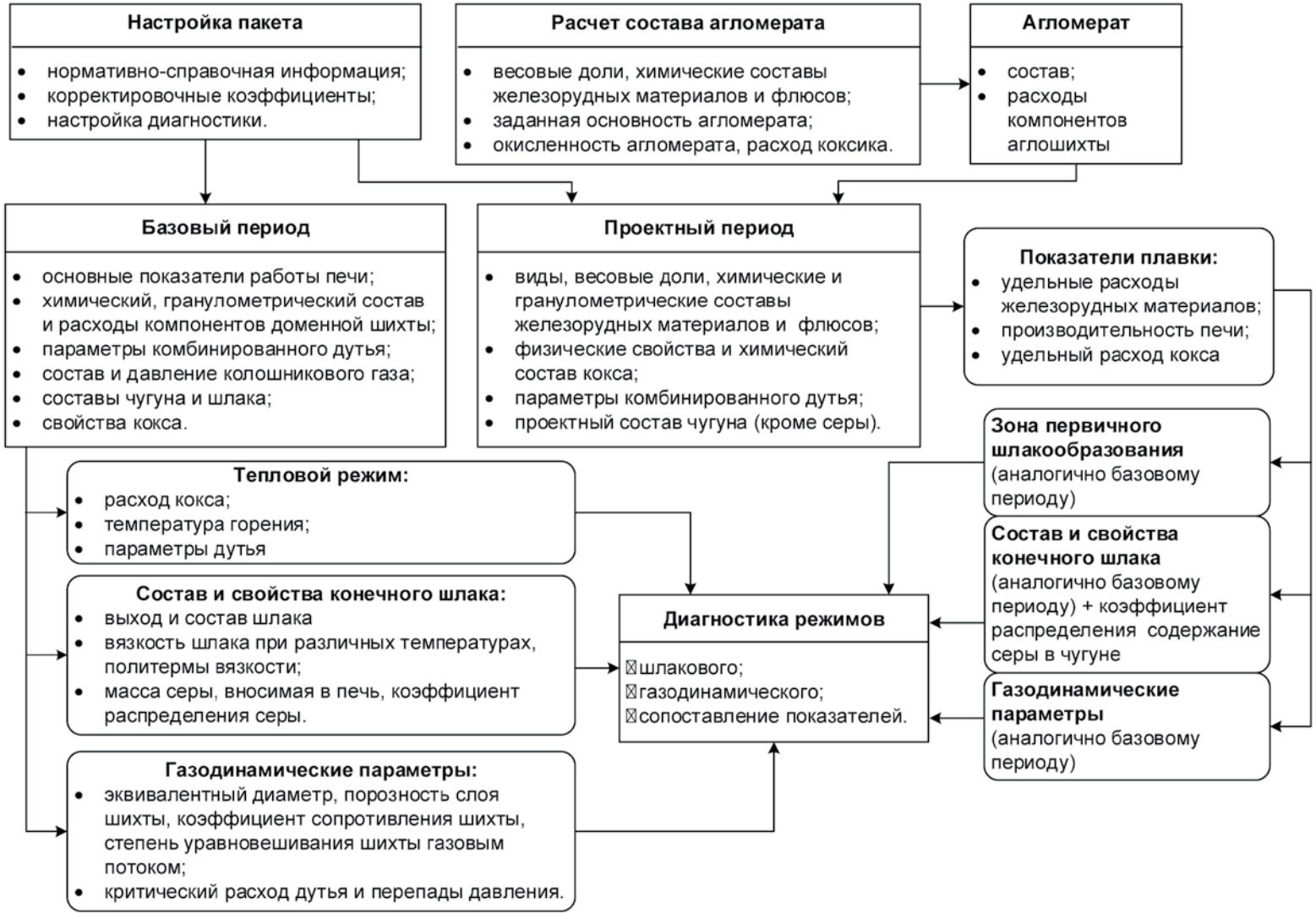


Рис. 1. Структура модели выбора состава железорудного сырья и флюсов

Обобщенная структура модели выбора состава железорудного сырья и флюсов приведена на рисунке 1. Анализ входных и выходных параметров позволяет констатировать, что математическая модель должна включать взаимосвязанные блоки расчета состава агломерата, теплового, шлакового и газодинамического режимов. Условно модель делится на две части: модель базового состояния и прогнозирующая модель. Модель базового (эталонного) состояния позволяет оценивать состояние процесса по усредненным показателям за базовый (эталонный) период работы печи. При этом используется фактически доступная информация о работе печи. Прогнозирующая модель на основании результатов, полученных с помощью модели базового состояния, позволяет оценить показатели доменного процесса в случае изменения условий плавки.

Моделирование свойств конечного шлака включают блоки:

— определения выхода, состава и политермы вязкости (зависимости вязкости шлака от его температуры) конечного шлака;
— расчета десульфурирующей способности шлака и содержания серы в чугуне;
— диагностики шлакового режима.

Проиллюстрируем возможности решения технологических задач на примере выбора состава доменной шихты.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОЛИ НЕОФЛЮСОВАННЫХ ОКАТЫШЕЙ

В настоящее время доменные печи ПАО «ММК» используют агломерат, производимый на собственной агломерационной фабрике, и железорудные окатыши Соколовско-Сарбайского, Михайловского, Лебединского и Качканарского ГОКов. Несмотря на более высокое содержание железа в железорудных окатышах в сравнении с агломератом ММК, удельная производительность доменных печей ММК не возрастала. Установлено, что увеличение доли окатышей в железорудной части шихты в печах ММК сверх 35% сопровождается возрастанием газодинамического сопротивления столба шихты в печи. По мере возрастания доли окатышей в железорудной части шихты изменяется состав шлака — содержание MgO в конечном шлаке снижается. Поэтому при доменной плавке с высокой долей окатышей в шихте необходимо предусматривать ввод в агломерационную шихту компонентов, повышающих содержание в агломерате магнезии (MgO). Анализ полученных зависимостей показывает, что при достижении определенного содержания MgO в шлаке происходит резкое повышение его вязкости; при этом предельная концентрация магнезии в шлаке зависит от основности шлака по показателям (CaO/SiO_2) и ($CaO+MgO)/SiO_2$ (рисунок 2 и рисунок 3) [5].

В связи с планируемым проведением реконструкционных работ в агломерационном цехе ПАО «ММК» гипотетически рассчитаны такие варианты, когда в доменных печах комбината соотношение агломерата и привозных неофлюсованных железорудных окатышей ССГПО изменится. Доля окатышей в шихте может возрасти от 35% (в настоящее время) до 60%. С увеличением доли неофлюсованных окатышей возникает ряд проблем, связанных с различием химического состава агломерата и окатышей, а также с различием физических характеристик этих железорудных материалов. При увеличении расхода неофлюсованных окатышей в шихте снижается основность загружаемых железорудных материалов и для получения требуемой основности шлака потребуется загрузка в печь основного флюса — известняка.

Для предотвращения загрузки в печь «сырого» известняка целесообразно ориентироваться на производство агломерата высокой основности. Максимальная основность агломерата, производимого на агломерационных машинах ММК, достигала значения $CaO/SiO_2 = 2{,}10$. Ориентировочные расчеты показали, что для полного исключения загрузки в печь «сырого» известняка необходима основность агломерата (при доле окатышей в шихте, равной 60%) $CaO/SiO_2 = 2{,}7$. Производство агломерата такой основности в агломерационном цехе ММК проблематично, поэтому при выполнении последующих расчетов принята основность производимого агломерата $CaO/SiO_2 = 2{,}10$.

Следующая проблема, связанная с увеличением в железорудной части шихты доли окатышей ССГПО — снижение концентрации MgO в конечном доменном шлаке. Это приведет к увеличению вязкости и ухудшению фильтруемости шлака через коксовую насадку, а также к снижению его серопоглотительной способности и ухудшению качества чугуна — повышению содержания в нем серы.

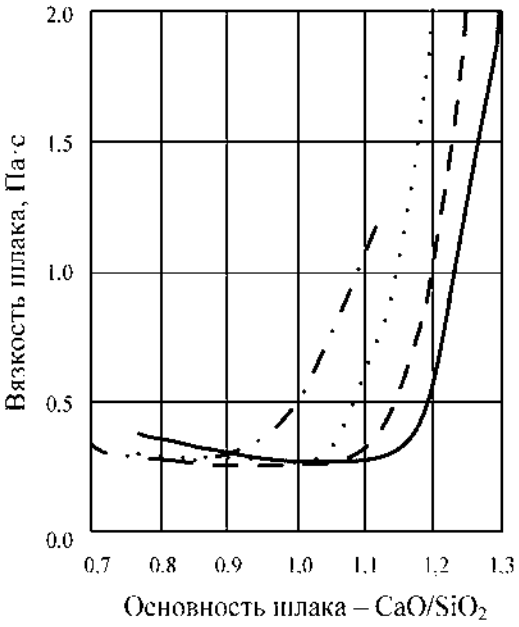


Рис. 2. Зависимость вязкости шлаков от основности шлака (CaO/SiO_2) при температуре 1500 °С: сплошная линия — MgO=8%; штриховая — MgO=10%; пунктирная — MgO=12%; штрихпунктирная — MgO=15%

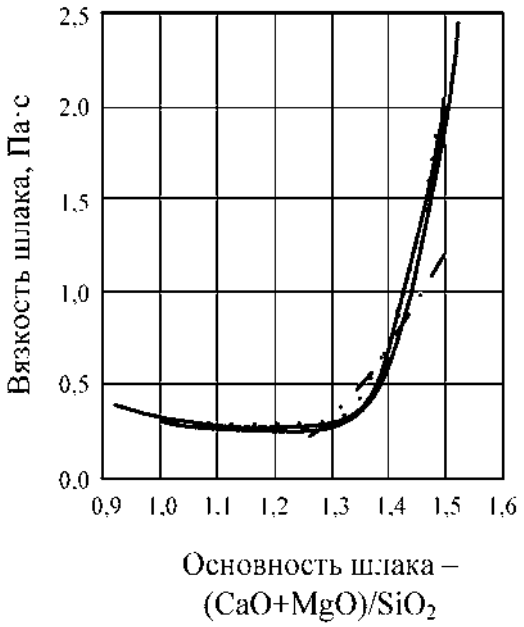


Рис. 3. Зависимость вязкости шлаков от основности шлака ($CaO+MgO)/SiO_2$ при температуре 1500 °С при разном содержании MgO (обозначения те же, что и на рис. 2)

Из-за более широкого температурного интервала плавления окатышей в сравнении с агломератом — на 30–50 °С (по данным работ [5, 6]) — следует ожидать увеличения температурного интервала плавления железорудной смеси и нижнего перепада давления газов в печи. Поэтому при выполнении прогнозных расчетов доменной плавки с высокой долей окатышей в шихте предусматривается ввод в аглошихту компонентов, повышающих содержание MgO в агломерате, — доломитизированного известняка и Бакальского сидерита.

Расчеты доменной шихты с высокой долей окатышей в смеси с агломератом для доменных печей ММК производились в следующей последовательности. По данным агломерационного производства определяли усредненный состав агломерационной шихты. Следует отметить, что железорудная часть аглошихты в настоящее время включает около 30 компонентов. В одном из прогнозных вариантов расчета к числу компонентов аглошихты добавляли Бакальский сидерит. В качестве флюсующих добавок использовали обычный известняк, а также смесь известняка и доломитизированного известняка.

При расчете состава агломерата основностью CaO/SiO_2 = 2,10 учитывали, что в аглошихту входит колошниковая пыль (1,7%). В качестве твердого топлива используется коксик, во всех вариантах расчета принимали его расход 5,0%. Расчет состава агломератов проводили по методике проф. В.И. Коротича [7]. Содержание монооксида железа (FeO) в агломерате во всех вариантах расчета принимали равным 10,0%.

Из многих вариантов расчета состава агломерата ниже приводятся данные по четырем. *В первом* варианте в качестве флюса при агломерации использовали обычный известняк, *во втором* — смесь основных флюсов: 72,5% обычного и 27,5% доломитизированного известняка, *в третьем* — в состав аглошихты включали Бакальский сидерит (10%), *в четвертом* — при спекании агломерата ММК использовали комбинированный флюс (70% обычного и 30% доломитизированного известняка). Цель расчета вводимого при агломерации флюса — получение концентрации MgO в конечном доменном шлаке в пределах 9–10%. Химический состав расчетных составов агломерата по четырем вариантам представлен в таблице 1.

На основе этих данных выполняли расчеты доменных шихт с определением суммарного расхода железорудных материалов (агломерата ММК и неофлюсованных окатышей), расхода кокса и необходимого расхода «сырого» известняка, температуры начала размягчения и расплавления железорудной смеси, температурного интервала плавления, состава и выхода шлака, а также свойств шлака — вязкости при 1400, 1450 и 1500°С и градиент вязкости, определяющий устойчивость шлаков в температурном интервале 1400–1500 °С [2, 3, 5].

Таблица 1. Расчетные составы агломератов ММК основностью CaO/SiO_2 = 2,10 с вводом в аглошихту флюса различных видов и Бакальского сидерита

Вид производимого агломерата	Содержание в агломерате элементов и оксидов, мас. %											
	Fe	Mn	S	P	Fe_2O_3	FeO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	TiO_2	MnO
Агломерат-1 (флюс — известняк)	53,47	0,21	0,01	0,02	65,27	10,00	13,88	6,61	1,86	2,01	0,27	0,27
Агломерат-2 (флюс — 72,5% известняк + 27,5% доломитиз. изв-к)	53,06	0,21	0,01	0,02	64,69	10,00	13,64	6,49	1,83	2,97	0,27	0,27
Агломерат-3 (ввод в аглошихту 10,0% Бакальского сидерита)	52,95	0,28	0,01	0,02	64,53	10,00	13,86	6,60	1,89	2,65	0,26	0,36
Агломерат-4 (флюс — 70% известняк + 30% доломитиз.изв-к)	53,00	0,21	0,01	0,02	64,61	10,00	13,61	6,48	1,83	3,10	0,27	0,27

Состав доменной шихты был следующий: для вариантов расчета состава агломерата с первого по третий — 40% агломерата ММК и 60% окатышей ССГПО, а для варианта 4 — 40% агломерата ММК, 30% окатышей ССГПО, 30% окатышей Михайловского ГОКа. Все расчеты выполняли при условии получения чугуна с содержанием кремния 0,70% при основности конечного шлака CaO/SiO_2 = 1,05 для следующих исходных данных: температура дутья — 1178 °С; содержание кислорода в дутье — 25,88%; расход природного газа — 103 м^3/т чугуна; содержание золы в коксе — 13,08%; содержание серы в коксе — 0,50%; прочность кокса M_{25} = 87,99%. При решении поставленной задачи исходили из того, что технология производства и химический состав железорудных окатышей ССГПО не меняется. Расход кокса рассчитывали методом проф. А.Н. Рамма [8]. Результаты выполненных расчетов представлены в таблице 2.

Расчеты показывают, что при загрузке в печь шихты варианта I состав получающегося шлака крайне неблагоприятный — концентрация Al_2O_3 = 13,88%, а MgO = 7,65% (таблица 2). При температуре 1450 °С шлак имеет недопустимо высокую вязкость — 8,2 пуаз (0,82 Па·с). Согласно предыдущим исследованиям по изучению шлакового режима плавки в доменных печах ММК было установлено, что повышение вязкости шлака η_{1450} > 6,5 пуаз (0,65 Па·с) сопровождается ухудшением текучести шлака, снижением эффективности десульфурации чугуна. Возрастает также вероятность возрастания нижнего перепада давления газов в печи и ограничения интенсивности плавки.

Для повышения концентрации магнезии в шлаке с целью повышения его серопоглотительной способности и улучшения температурных характеристик плавления ЖРМ выполнен вариант расчетов II (таблица 2) при использовании для спекания агломерата комбинированного флюса. Доменная плавка агломерата-2 совместно с окатышами ССГПО в соотношении 40:60% приводит к возрастанию концентрации магнезии в шлаке до MgO = 9,86% (см. табл. 2) и улучшению вязкопластичных характеристик загружаемой в доменную печь железорудной смеси: $\Delta t_{пл}$ уменьшается с 295 °С (в варианте I) до 278 °С. Снижается и вязкость шлака при температуре 1450 °С — до η_{1450} = 7,5 пуаз (0,75 Па·с). Однако эта характеристика также завышена и не соответствует нормальному протеканию шлакового режима плавки.

При том же соотношении в доменной шихте агломерата и окатышей ССПГО (40:60%) выполнен вариант расчета III для проверки целесообразности ввода в аглошихту ММК Бакальских сидеритов с целью получения доменных шлаков с повышенной концентрацией MgO.

Таблица 2. Некоторые параметры вариантов доменной плавки в печах ПАО «ММК»

Параметр	Варианты доменной плавки			
	I*	II*	III*	IV**
	Агломерат-1	Агломерат-2	Агломерат-3	Агломерат-4
Суммарный расход железорудных материалов (ЖРМ), кг/т чугуна	1603,4	1607,8	1608,5	1604,0
Удельный расход, кг/т чугуна:				
кокса	443,8	445,6	445,1	449,4
«сырого» известняка	31,8	32,4	28,4	56,4
шлака	314	321	320	328
Состав шлака, %: (CaO)	38,47	37,53	37,94	39,64
(SiO_2)	36,64	35,74	36,13	37,75
(Al_2O_3)	13,88	13,56	13,75	10,88
(MgO)	7,65	9,86	8,83	8,63
(TiO_2)	1,59	1,56	1,55	1,47
Вязкость шлака, пуаз/(Па·с) при температуре, °С:				
1400	17,3/(1,73)	16,7/(1,67)	17,0/(1,70)	13,9/(1,39)
1450	8,2/(0,82)	7,5/(0,75)	7,8/(0,78)	5,8/(0,58)
1500	4,7/(0,47)	4,2/(0,42)	4,4/(0,44)	3,2/(0,32)
Градиент вязкости шлака, пуаз/°С	0,22	0,24	0,23	0,29
Вязкопластичные характеристики смеси ЖРМ, °С:				
температура начала размягчения	1157	1167	1163	1162
температура расплавления	1453	1444	1447	1436
температурный интервал плавления	295	278	284	274

Примечание. Основность шлака CaO/SiO_2 = 1,05.
* Состав доменной шихты: 40% агломерата ММК основностью CaO/SiO_2 = 2,1 + 60% окатышей ССГПО.
** Состав доменной шихты: 40% агломерата ММК +30% окатышей ССГПО + 30% окатышей Михайловского ГОКа.

Действительно, добавка 10% Бакальских сидеритов приводит к получению конечных шлаков с содержанием MgO = 8,83%. Однако характеристики шлакового режима плавки уступают по эффективности варианту II — MgO в шлаке меньше (8,83 вместо 9,86%), а концентрация Al_2O_3 в шлаке даже немного возрастает. Температурные характеристики плавления железорудных материалов (ЖРМ) ухудшаются — интервал плавления $\Delta t_{пл}$ увеличивается до 284 °С (в варианте II $\Delta t_{пл}$ = 278 °С). В варианте расчета III вязкость шлака при температуре 1450 °С неприемлема — η_{1450} = 7,8 пуаз (0,78 Па·с). Таким образом, введение в аглошихту ММК Бакальского сидерита не решает проблему снижения в шлаке — Al_2O_3 = 13,75%.

Для доведения концентрации Al_2O_3 и MgO в шлаке до требуемых значений выполнен вариант расчета IV, предполагающий использование шихты, состоящей из 40% агломерата и различных окатышей (30% ССГПО и 30% Михайловского ГОКа). Как показали расчеты, при принятом соотношении ЖРМ в загружаемой шихте характеристики вязкости шлака в рабочем интервале температур соответствуют требуемым при температуре 1450 °С — η_{1450} = 5,8 пуаз (0,58 Па·с), а при температуре 1500 °С — 3,2 пуаз (0,32 Па·с). Температурный интервал плавления, определяющий толщину вязкопластичной зоны, минимален из всех рассмотренных вариантов — $\Delta t_{пл}$ = 274 °С. Однако при выбранном соотношении ЖРМ для получения заданной основности шлака CaO/SiO_2 = 1,05 требуется загрузка 56,4 кг/т чугуна «сырого» известняка, вследствие чего удельный расход кокса несколько завышается — 449,4 кг/т чугуна.

Таким образом:

1. При увеличении доли неофлюсованных окатышей в загружаемой шихте (до 60%) для достижения требуемой основности доменного шлака возникает необходимость загрузки в печь известняка.
2. Для снижения массы «сырого» известняка, загружаемого в печь, необходим агломерат высокой основности. В условиях аглопроизводства ОАО «ММК» отработан режим спекания агломерата основностью CaO/SiO_2 = 2,1, принятой в качестве максимальной при выполнении прогнозных расчетов.
3. По мере возрастания доли окатышей ССГПО в загружаемой шихте происходит снижение концентрации MgO в доменном шлаке. Для повышения концентрации MgO в шлаке целесообразно при производстве агломерата использовать комбинированный основной флюс, состоящий из 70% обычного и 30% доломитизированного известняка.
4. Анализ расчетов показал, что увеличение концентрации MgO в доменном шлаке путем введения в агломерационную шихту Бакальских сидеритов менее предпочтителен по сравнению с производством агломерата с применением смеси обычного и доломитизированного известняка
5. Дополнительными расчетами установлено, что при увеличении в шихте доли окатышей ССГПО наблюдается возрастание содержания Al_2O_3 в шлаке. С целью снижения его содержания до приемлемого для нормального шлакового режима уровня ($Al_2O_3 \approx$ 10–12%) целесообразно часть окатышей ССГПО заменять окатышами Михайловского ГОКа. Расчетным путем установлено, что при использовании доменной шихты, состоящей из 40% агломерата ММК основностью CaO/SiO_2 = 2,1, 30% окатышей ССГПО и 30% окатышей Михайловского ГОКа, концентрация Al_2O_3 в доменном шлаке достигает ≈10,9%.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВВОДА КОНВЕРТЕРНОГО ШЛАКА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

В таблице 3 представлены химические составы основных железорудных компонентов, используемые в доменных печах ОАО «ММК». Конвертерный шлак в сравнении с железорудными материалами, входящими в состав загружаемых в печь других компонентов, характеризуется низким содержанием железа, высоким содержанием фосфора, сравнительно высоким содержанием оксида магния и монооксида марганца и высокой основностью.

Таблица 3. Химический состав шихтовых материалов

Материал	Состав, %									
	Fe	FeO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	TiO_2	MnO	P	S
Агломерат ММК	55,21	12,11	11,18	6,82	1,39	2,28	0,23	0,283	0,032	0,047
Окатыши ССГПО	63,34	н. св.	1,37	4,24	1,86	1,00	0,33	0,215	0,018	0,017
Окатыши Михайловские	63,19	н. св.	0,69	8,61	0,16	0,29	0,10	0,020	0,011	0,007
Конвертерный шлак	17,80	н. св.	35,30	17,76	4,16	11,42	0,73	3,700	0,278	0,090

Последовательность выполнения расчетов по выявлению влияния ввода конвертерного шлака на результаты доменной плавки заключалась в анализе следующих вариантов.

Ввод конвертерного шлака в аглошихту

Первоначально выполнялись расчеты состава агломерационных шихт на базе рудных материалов, из которых готовится аглошихта в аглопроизводстве ОАО «ММК». Расчеты состава аглошихт проведены по двум вариантам — базовому, в котором перечень компонентов был установлен технологическим режимом, и прогнозному, в котором в перечень этих компонентов введен конвертерный шлак. Доля конвертерного шлака устанавливалась таким образом, чтобы его расход в пересчете на доменную шихту был равен 70–90 кг/т чугуна, т.е. в пределах, которые были установлены в период промышленных плавок на доменной печи № 2 в 2013 г. и 2016 г. (см. далее).

Таблица 3. Химический состав шихтовых материалов

Материал	Состав, %									
	Fe	FeO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	TiO_2	MnO	P	S
Агломерат ММК	55,21	12,11	11,18	6,82	1,39	2,28	0,23	0,283	0,032	0,047
Окатыши ССГПО	63,34	н. св.	1,37	4,24	1,86	1,00	0,33	0,215	0,018	0,017
Окатыши Михайловские	63,19	н. св.	0,69	8,61	0,16	0,29	0,10	0,020	0,011	0,007
Конвертерный шлак	17,80	н. св.	35,30	17,76	4,16	11,42	0,73	3,700	0,278	0,090

Далее, на основе полученных составов аглошихт, выполнялись расчеты состава агломератов с определением расходов рудных компонентов аглошихты и расхода флюса, а также состава получаемого агломерата. Основность агломерата выбирали таким образом, чтобы свести к минимуму расход флюсов на доменном переделе.

Методом итераций установлено, что в принятом соотношении местного агломерата и привозных Михайловских окатышей и ССГПО основность спекаемого агломерата должна составлять CaO/SiO_2 ~ 1,65 (таблица 4). Затем проводили расчет доменных шихт с определением удельного расхода кокса железорудных материалов, флюса. Рассчитывали состав и выход шлака, определялись свойства шлака — его вязкость в температурном интервале 1400–1500 °С, градиент вязкости в интервале вязкостей от 0,7 до 2,5 Па*с/°С ($\Delta\eta_{0,7}^{2,5}$).

Таблица 4. Состав и температурные характеристики плавления агломерата, расходы рудного материала, флюса и твердого топлива

Вариант	Химический состав агломерата, %											
	Fe	Mn	S	P	FeO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	TiO_2	MnO	CaO/SiO_2
Базовый	56,02	0,23	0,035	0,034	11,42	10,77	6,53	1,71	2,10	0,22	0,29	1,65
	Расход рудных материалов — 913,5 кг/т.; известняка — 135,0 кг/т; коксика — 44,5 кг/т. Температуры: начала размягчения — 1214 °С; расплавления — 1388 °С; температурный интервал плавления — 174 °С.											
Прогнозный	Fe	Mn	S	P	FeO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	TiO_2	MnO	CaO/SiO_2
	52,95	0,41	0,029	0,051	11,42	12,62	7,65	2,00	2,61	0,32	0,53	1,65
	Расход рудных материалов — 916,0 кг/т.; известняка — 130,5 кг/т; коксика — 44,5 кг/т. Температуры: начала размягчения —— 1221 °С; расплавления — 1383 °С; температурный интервал плавления — 162 °С											

Расчет доменных шихт выполнен для трех вариантов. Необходимость третьего варианта была вызвана тем, что с вводом в шихту конвертерного шлака значительно снижается содержание железа в железорудной части шихты и результаты плавки ухудшаются — возрастает выход шлака и расход кокса. Поэтому в третьем варианте расчета «Прогнозный 1» доля богатых по железу окатышей была увеличена до уровня, позволяющего довести содержание железа в железорудной части шихты до базового периода. Результаты расчетов, выполненные применительно к доменной печи № 2, приведены в таблице 5.

Анализ полученных расчетных данных показывает следующее. Агломерат с введенным в шихту конвертерным шлаком характеризуется снижением концентрация железа в агломерате, пониженным значением температурного интервала плавления. Сравнение результатов расчета доменной плавки при использовании рассматриваемых шихт показывает, что использование агломерата с вводом в его состав конвертерного шлака ухудшает результаты плавки — снижается производительность и увеличивается расход кокса.

Таблица 5. Показатели доменной плавки по различным вариантам

Показатель	Варианты расчета		
	Базовый	Прогнозный	Прогнозный 1
Производство, т/сутки	3354	3240	3330
Расход кокса, кг/т чугуна	424	435	426
Расход ЖРМ, кг/т	1634	1689	1645
Доли ЖРМ в шихте, кг/кг агломерат ММК Соколовские окатыши Михайловские окатыши	 0,653 0,199 0,148	 0,653 0,199 0,148	 0,500 0,286 0,214
Содержание железа в ЖРМ, %	58,54	56,54	58,12
Расход конвертерного шлака, кг/т	-	84,4	60,6
Расход флюса, кг/т	4,6 (кварцит)	12,5 (кварцит)	29,9 (известняк)
Выход шлака, кг/т чугуна	316	378	333
Состав шлака, % CaO SiO_2 Al_2O_3 MgO	38,93 38,77 10,91 7,97	39,56 39,55 9,85 8,41	39,04 39,18 10,88 8,50
Вязкость шлака, Па*с при 1500 ^{0}C	0,33	0,30	0,33
Градиент вязкости (0,7–2,5), Па*с/^{0}C	0,0186	0,0212	0,0190
Состав чугуна, % [Mn] [P]	0.20 0,044	0,36 0,064	0,28 0,052

Для компенсации отрицательного влияния конвертерного шлака при вводе его в доменную печь необходимо менять соотношение агломерата и окатышей в шихте печей — увеличивать долю богатых по содержанию железа неофлюсованных окатышей. Методом последовательных приближений было определено, что для сохранения содержания железа в железорудной части шихты при использовании конвертерного шлака долю окатышей нужно увеличить до 50% против 34,7% в базовом варианте (таблица 5, вариант «Прогнозный 1»). В этом случае по расходу кокса доменная печь «выходит» практиче-

ски на уровень базового периода; сохраняется при этом и производительность печи. Однако, снижение доли агломерата приводит к уменьшению удельного расхода конвертерного шлака на единицу чугуна, а, следовательно, и к сокращению объёма его утилизации.

Таким образом, ввод конвертерного шлака в аглошихту нецелесообразен.

Ввод конвертерного шлака в непосредственно в шихту доменной печи

Для выявления влияния ввода конвертерного шлака непосредственно в шихту доменных печей, т.е. без корректировки состава агломерата и других режимных параметров работы доменной печи, были выполнены сравнительные расчеты по методике, представленной в работах [2–4]. За исходные показатели были взяты результаты работы ДП-2 в 2013 г. Результаты расчетов приведены в таблице 6. Расчеты выполнили в двух вариантах: базовом, в котором в доменную шихту не вводился конвертерный шлак, и прогнозном, когда в доменную шихту вводили конвертерный шлак в количестве 109 кг/т чугуна. В прогнозном варианте дутьевые параметры и химический состав выплавляемого чугуна сохраняли на уровне базового варианта. Соотношение компонентов железорудных материалов в составе шихты в сравниваемых вариантах были взяты одинаковыми.

Таблица 6. Некоторые параметры работы печи при вводе в шихту конвертерного шлака

Параметры работы печи	Базовый вариант	Прогнозный вариант
Производство, т/сут.	2979	2905
Изменение расхода кокса, кг/т чугуна		+ 10,0
Параметры дутья: температура дутья, ^{0}C содержание кислорода, % расход природного газа, м^3/т	1135 25,56 69,1	1135 25,56 69,1
Расход конвертерного шлака, кг/т чугуна	0	109
Содержание железа в шихте ЖРМ, %	58,06	55,77
Содержание окатышей в ЖРМ, доли ед.	0,32	0,32
Расход кварцита, кг/т чугуна	8,4	27,9
Выход шлака, кг/т чугуна	330	427
Содержание фосфора в чугуне, %	0,057	0,072
Приход серы, кг/т.чугуна	2,779	2,882
Коэффициент распределения серы (L_s), доли	30,8	36,3
Содержание серы в чугуне, %	0,025	0,015
Состав шлака, % (CaO) (SiO_2) (Al_2O_3) (MgO)	38,22 38,22 11,58 8,24	38,77 38,77 10,18 9,54
Основности шлака, доли: (CaO/SiO_2) $(CaO+MgO)/SiO_2$ $(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)$	1,000 1,216 0,933	1,000 1,246 0,987
Вязкость шлака, Па*с при 1400^{0}C при температуре шлака 1500^{0}C	0,77 0,35	0,75 0,27
Градиент вязкости, Па*с/^{0}C	0,017	0,025

При неизменном соотношении железорудных компонентов в загружаемой шихте для поддержания основности шлака равной CaO/SiO_2 = 1,0 потребное количество кварцита увеличивается с 8,4 кг/т чугуна до 27,9 кг/т чугуна, производительность печи уменьшается с 2979 т/сут. до 2905 т/сут. при увеличении расхода кокса на 10 кг/т чугуна. Существенно растет выход шлака (с 320 кг/т чугуна в базовом варианте до 427 кг/т чугуна в прогнозном).

Поскольку поступающий с шихтой фосфор полностью переходит в чугун, то при вводе в шихту конвертерного шлака концентрация фосфора в чугуне существенно возрастает. Практикой работы доменных печей ПАО «ММК» установлено, что негативные последствия работы печи на шлаках с высоким значением градиента вязкости начинаются при ($\Delta\eta_{0,7}^{2,5}$) >0,030–0,032 Па*с/°С [1–3]. Значение градиента вязкости без ввода конвертерного шлака в печь составляло для базового варианта 0,017 Па*с/°С. При вводе конвертерного шлака значение этого показателя хотя и повышается до 0,025 Па*с/°С, но не превышает указанного предельного значения. За счет изменения состава, роста суммарной и полной основности шлака и уменьшения его вязкости увеличивается коэффициент распределения серы между шлаком и чугуном ($Ls = (S)/[S]$). Поэтому, несмотря на повышенный приход серы, обусловленный увеличением расхода кокса, снижается содержание серы в чугуне.

Таким образом, ввод конвертерного шлака в доменную шихту без корректировки состава загружаемых ЖРМ и других режимных параметров также нецелесообразен, т.к. существенно ухудшаются показатели работы доменной печи.

Ввод в шихту доменных печей конвертерного шлака целесообразен, если при этом одновременно производится корректировка режимных параметров работы печи. Для выявления особенностей доменной плавки с вводом в шихту конвертерного шлака и при одновременном изменении состава загружаемых ЖРМ анализировалась работа печи № 2 (таблица 7). Печь работала без использования конвертерного шлака с января по июнь 2016 г. и с его вводом с июля по ноябрь 2016 г. [9]. В период проведения промышленных плавок на доменной печи № 2 изменялось соотношение «агломерат — окатыши». Если доля окатышей в железорудной части шихты без ввода в печь конвертерного шлака составляла 34,95%, то при вводе в печь конвертерного шлака доля окатышей увеличивалась до 48,37%.

Таблица 7. Основные показатели плавки ДП-2 ПАО «ММК» в период работы январь-ноябрь 2016 г.

Периоды	Производительность печи, т/сут	Изменение расхода кокса, кг/т чугуна	Содержание железа в шихте, %	Расход кварцита, кг/т чугуна	Доля окатышей в шихте, %	Расход конвертерного шлака, кг/т чугуна
январь—июнь	3369		58,51	5,13	34,95	—
июль—ноябрь	3409	– 4,7	59,19	11,14	48,37	68,1

В анализируемый период работы печи основность шлака выдерживалась в пределах $(CaO+MgO)/SiO_2$ =1,20–1,25. Важно отметить, что стало возможным увеличение расхода природного газа с 102,5 м³/т до 109,8 м³/т при увеличении содержания кислорода в дутье с 26,38 до 27,59%.

В период использования конвертерного шлака при одновременном увеличении доли неофлюсованных окатышей в шихте возросла производительность печи на 40 тонн в сутки и снизился удельный расход кокса на 4,7 кг/т чугуна. Приведение периодов к одинаковым условиям способом по-факторного счёта показало, что фактически расход кокса ниже в периоде с использованием конвертерного шлака на 18,2 кг/т чугуна, а производительность выше на 77 тонн в сутки. В связи с этим допустимо предположить, что такое значимое улучшение подтверждает значительные экономические потери в связи с работой с искажённым профилем. В данном случае только комплекс технологических мероприятий, позволивших уйти от неровного хода и глубокого расстройства доменной плавки, обеспечил повышение экономичности доменной плавки.

Таким образом:

1. Ввод конвертерного шлака в агломерационную и доменную шихты без корректировки режимных параметров работы нецелесообразен, т.к. существенно ухудшает показатели работы доменной печи.
2. Длительный режим работы доменных печей с использованием в шихте конвертерного шлака будет сопровождаться постепенным накапливанием фосфора в металле и приведет к увеличивающимся проблемам по удалению фосфора при конвертерном переделе.
3. Использование конвертерного шлака позволяет увеличить расход неофлюсованных окатышей без изменения основности агломерата и улучшить показатели доменной плавки.
4. Решение вопроса о целесообразности постоянного использования конвертерного шлака в доменных печах возможно при комплексном анализе этой проблемы: оценке экономической целесообразности его использования в качестве флюсующей добавки, экономической проработки этого вопроса в комплексе доменное — конвертерное производство, анализе экологических проблем функционирования предприятия и региона.

Программный модуль «Газодинамический режим доменной плавки» позволяет выполнить следующие задачи [1–4]:

1) расчет и визуальное отображение газодинамических характеристик слоя шихтовых материалов (верхнего, нижнего и общего перепадов давления; степени уравновешивания шихты газом по сечению печи; расхода дутья; скоростей фильтрации газа в области горна, распара и колошника);
2) оценку изменения перепадов давления и степени уравновешивания шихты в отдельных зонах печи в проектном периоде при изменении параметров загружаемой шихты (уровня засыпи; гранулометрического состава и порозности слоев ЖРМ и кокса; параметров комбинированного дутья; давления колошникового газа; удельного выхода шлака).

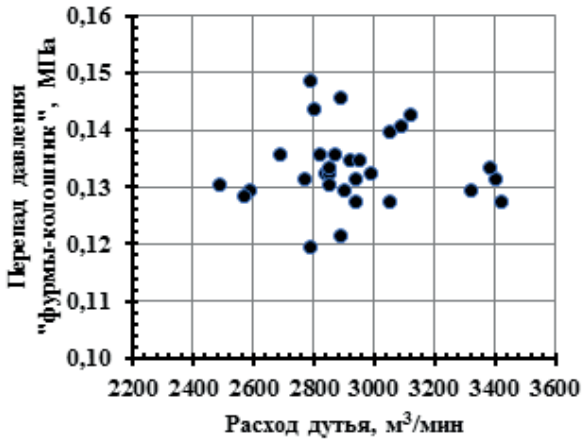


Рис. 4. Изменение перепада давления газа по высоте печи в зависимости от расхода дутья (ДП-1 ПАО «ММК»)

Основной функцией программы является расчет газодинамического режима доменной плавки при фактических показателях работы доменной печи. По исходным данным, полученным по выбранной доменной печи, рассчитываются показатели газодинамики для прогнозного периода.

С использованием программного модуля был выполнен анализ дутьевых и газодинамических параметров плавки на доменных печах ПАО «ММК». Анализ показал следующее.

— Скорость истечения дутья из воздушных фурм доменной печи № 1 с учетом потерь дутья по тракту (приняты равными 5%) и при диаметре фурм 160 мм составляет 212 м/с. Расчетные потери напора дутья, проходящего через фурмы, составляют 33,4 Па.
— Кинетическая энергия истечения дутья равная 80,2 кДж/с создает фурменный очаг протяженностью к центру печи 1,54 м (по 2% CO_2 в газовой фазе). Суммарная площадь окислительных зон фурменных очагов, отнесенная к площади сечения горна, достигает 26,56%.

— Средняя (для верха и низа печи) степень уравновешивания шихты газовым потоком (СУ) составляет 41,0%.

Установлено также, что при недостаточной форсировке плавки дутьем наблюдается значительный диапазон колебаний перепада давления газа, которые значительно снижаются при увеличении расхода дутья, что делает режим доменной плавки более стабильным (рис. 4).

Анализ показал, что при недостаточной форсировке плавки дутьем наблюдается значительный диапазон колебаний перепада давления газа, которые значительно снижаются при увеличении расхода дутья, что делает режим доменной плавки более стабильным.

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ РАСЧЕТА МАТЕРИАЛЬНЫХ И ТЕПЛОВОГО БАЛАНСОВ ПЛАВКИ

Блок расчета материальных и теплового балансов плавки включает, как выполнение общих общепризнанных балансов, так и расчеты балансов железа, серы, марганца, титана и др. элементов. По результатам анализа теплового баланса плавки можно определять возможные пути экономии расхода топлива на доменной печи.

Показано, в частности, что невязка материального баланса для ДП-1 ПАО «ММК» составила 0,3%, что свидетельствует о корректности входных и выходных параметров по сырью и продуктам плавки. Анализ баланса по железу свидетельствует о расходе железа на получение единицы чугуна и указывает на потери железа при плавке. Результаты этого баланса позволяют определять степень перехода железа в чугун — значение этой величины для условий плавки в доменном цехе составило $\eta Fe = 0,968$.

Выполненный баланс по марганцу показал, что из поступившего в печь марганца в чугун переходит 79,4%, а 21,8% переходит в шлак. Баланс по сере показал, что распределение серы между продуктами плавки соответствует обычной технологии выплавки передельного чугуна.

Невязка по титану значительная — она составляет 0,45 кг/т чугуна: в печь с компонентами шихты вносится 2,86 кг/т чугуна, а в продукты плавки — чугун, шлак и колошниковую пыль переходит только 2,41 кг/т. Можно предположить, что невязка баланса титана связана с тем, что часть титана остается в печи в виде карбидов (TiC) и карбонитридов (TiCN) и при контакте со стенками горна остается в печи в виде неплавких карбонитридных образований. Повышению массы образующихся карбонитридных неплавких образований способствует «горячее» ведение доменной плавки при повышенном содержании кремния в чугуне. Работа доменных печей ПАО «ММК» с высоким содержанием кремния в чугуне может провоцировать опасное накапливание карбидов и карбонитридов титана в горне печи, и при длительной работе печи с высоким нагревом приводить к его зарастанию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработана и принята в опытно-промышленную эксплуатацию ПАО «ММК» модельная система поддержки принятия решений (модель доменного процесса УрФУ–ММК), которая позволяет проводить диагностику работы доменных печей на основе фактических и расчетных данных, а также решать комплекс технологических задач в прогнозном режиме.

Список литературы

1. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.Л. Терентьев, Л.Ю. Гилева, В.Ю. Рыболовлев, И.Е. Косаченко, В.В. Лавров, А.В. Терентьев; под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. 301 с.
2. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев [и др.]. Под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. — 558 с.
3. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, А.В. Краснобаев, О.П. Онорин, И.Е. Косаченко. Под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 465 с.
4. Использование модельных систем для решения новых технологических задач в доменном произ-

водстве / А.В. Павлов, А.А. Полинов, Н.А. Спирин, О.П. Онорин, В.В. Лавров В.В. // Металлург. 2017. № 6. С. 35–40.
5. Работа доменных печей ПАО «ММК» с высокой долей окатышей в шихте. Часть 1 / А.В. Павлов, О.П. Онорин, Н.А. Спирин, А.А. Полинов // Металлург. 2016. № 6. С. 36–42.
6. Работа доменных печей ОАО «ММК» с высокой долей окатышей в шихте. Часть 2 / А.В. Павлов, О.П. Онорин, Н.А. Спирин, А.А. Полинов // Металлург. 2016. № 7. С. 15–19.
7. Теоретические основы технологий окускования металлургического сырья. Агломерация: учебное пособие / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Л.И. Каплун. 2-е изд., исправл. и дополн. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 417 с.
8. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. — М.: Металлургия, 1980. — 304 с.
9. Влияние расхода конвертерного шлака на показатели работы доменных печей / А.А. Полинов, А.В. Павлов, Г.Н. Логачёв, О.П. Онорин., Н.А. Спирин // Металлург. 2017. № 4. С. 41–47.

А.А. Полинов, И.Е. Прохоров, ПАО «ММК»
В.М. Паршаков, ООО «АКОММ»
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»

КОНТРОЛЬ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ В КАЧЕСТВЕ «ОБРАТНОЙ СВЯЗИ» ПРИ ВЫБОРЕ РЕЖИМА РАБОТЫ БЗУ

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях при большом дефиците коксующихся углей и существенном увеличении стоимости кокса вопрос его экономии в доменной плавке приобретает первостепенное значение. Экономия кокса без капитальных затрат может быть достигнута только за счет совершенствования управления доменной плавкой, прежде всего, за счет достижения максимального использования восстановительной способности газового потока. Установка БЗУ преследует основную цель — добиться такого распределения материалов по диаметру и окружности печи, при котором достигается максимальное использование тепловой и восстановительной энергии газового потока.

Контроль и оптимизация радиального газораспределения занимает важное место в управлении доменной плавкой. Как показывает зарубежный опыт [74, 79, 81], только за счет оптимизации радиального газораспределения 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: имеются данные о преобладающем влиянии зоны плавления на общее сопротивление печи и на распределение газового потока [45, 71, 74, 75]. В некоторых работах (например, в [62]) зона плавления рассматривается как распределитель газового потока в печи.

В ФРГ получены данные, согласно которым наилучшие показатели плавки достигнуты при равномерном распределении газового потока

по радиусу колошника доменной печи [77], а в Японии — даже при значительном раскрытии периферии [79]. Поэтому появился целый ряд работ, в которых полученные результаты плавки связывают не столько с распределением параметров шихты и газа на колошнике доменной печи, сколько с формой, положением и размером зоны плавления шихты.

Несмотря на длительное применение БЗУ, до настоящего времени не разработаны оперативные критерии, которые бы использовались в качестве «обратной связи» для выработки управляющих воздействий на режим работы БЗУ.

Для решения этой задачи на ПАО «ММК» проводятся следующие работы:

- контроль и оптимизация распределения материалов и газов по радиусу колошника доменной печи;
- контроль и минимизация окружной неравномерности распределения материалов и газов на колошнике;
- контроль параметров формы зоны плавления в заплечиках доменной печи;
- контроль температуры материалов и продуктов плавки в нижней части шахты, распаре и заплечиках;
- выбор режимов работы БЗУ с использованием информации о радиальном и окружном газораспределении на колошнике печи, формы зоны плавления и температуры материалов в нижней части шахты, распаре и заплечиках доменной печи.

Контроль и управление распределением шихты и газа по радиусу печи на колошнике

Большое распространение получил контроль распределения шихты по радиусу печи с помощью математических моделей [1–4, 6, 12, 16–21]. Однако математические модели не дают желаемых результатов вследствие больших допущений, заложенных при их разработке, а именно:

— принимается некий профиль засыпи на печи перед очередной загрузкой материалов в печь. Однако, как отмечалось в работе [10], он может меняться на работающей печи от подачи к подаче, что скажется на распределении материалов при загрузке их в печь;
— задаются углы естественного откоса материалов при формировании поверхности загруженной шихты. Однако углы откосов материалов на работающей печи отличаются от углов естественных откосов при загрузке материалов на остановленной печи или в период её загрузки перед задувкой доменной печи;
— траектория падения материалов, ссыпающихся с лотка печи, на работающей печи из-за влияния восходящего потока газа отличается от траектории, полученной при загрузке материалов в доменную печь;
— попадающие на разрыхленную поверхность шихты материалы на работающей ДП не ссыпаются под углом естественного откоса (как принимается в модели), а выклиниваются или проваливаются. Происходит сдвиг лежащих материалов на поверхности шихты. О том, что при существующей интенсивности плавки происходит дополнительное разрыхление шихты в печи, неоднократно отмечалось в литературе [22, 23];
— при загрузке рудной части шихты на коксовую имеет место «выгон» кокса к центру печи [12]. Оценить это количественно не возможно, а значит и учесть в расчетах;
— принимается, что сформированные на колошнике печи слои железорудной и коксовой частей шихты в неизменном виде сохраняются при движении шихты от уровня засыпи до зоны плавления;
— не учитывается возможная разность скоростей движения материалов по радиусу печи и сегрегация материалов при загрузке материалов в печь и их движение по поверхности шихты.

Все эти принятые допущения в математических моделях приводят к тому, что распределение материалов по радиусу на работающей печи отличается от расчетной. Математические модели контроля и управления распределением шихты по радиусу печи не дают точной информации и их применение искажает фактические количественные показатели. Широкое распространение получил контроль распределения газового потока по радиусу печи. Считается, что от распределения рудной нагрузки по радиусу печи изменяется радиальное газораспределение.

В 2006 г. на ПАО «ММК» было принято решение установить на ДП-4 радиальный многоточечный термозонд (РМТ) (рисунок 2) [12]. После удачной эксплуатации на ДП-4 РМТ был установлен на оснащенных БЗУ доменных печах ПАО «ММК». Срок эксплуатации РМТ на ДП ПАО «ММК» составляет 4–5 лет.

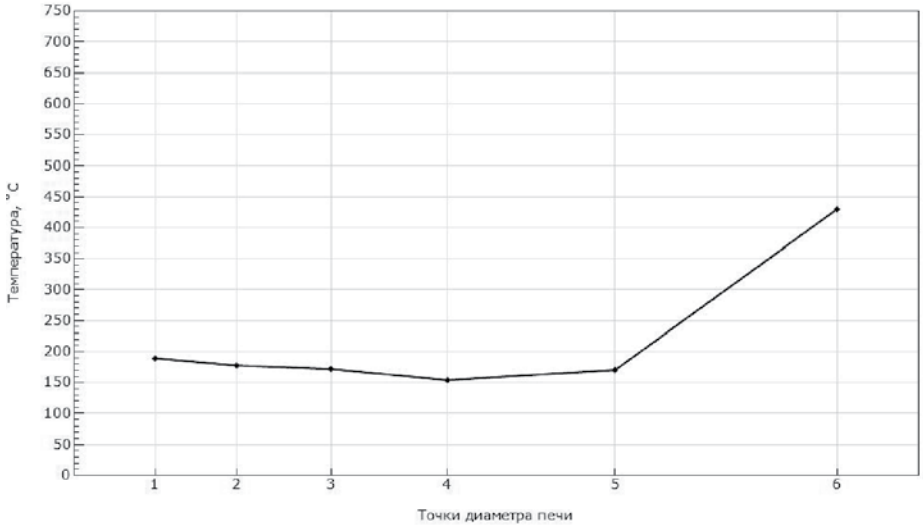


Рис. 1. Распределение температуры газа по радиусу ДП 2 за сутки (26.07.2017 00:00 — 28.06.2017 00:00)

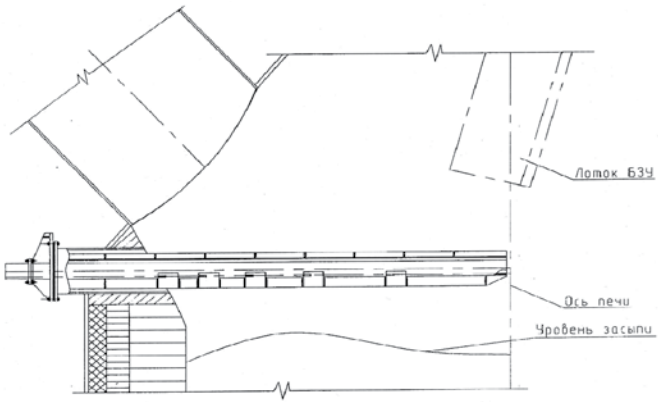


Рис. 2. Радиальный многоточечный термозонд для доменных печей с лотковым загрузочным устройством

Используемая конструкция РМТ на ДП ПАО «ММК» имеет следующие преимущества по сравнению с другими конструкциями:

- отсутствие охлаждения несущей конструкции, вызывающего искажение показаний термопар;
- минимальное техническое обслуживания РМТ в период эксплуатации;
- длительный срок службы защитного кожуха РМТ;
- возможность замены температурных кассет РМТ на кратковременной остановке печи;
- незначительный вес (до 25 кг) температурных кассет РМТ;
- установка РМТ в скошенном ряду защитных плит колошника.

Для достижения заданного радиального распределения газа необходимо осуществлять следующее:

— непрерывный опрос показаний РМТ и газоанализатора;
— усреднять показания РМТ и газоанализатора после закрытия чугунной лётки;
— расчёт показателей распределения температуры газа по радиусу печи по следующим выражениям:

$$KP = t_п / t_ц, \text{ дол. ед., } KPP = t_п / t_р, \text{ дол. ед.,}$$

где $t_п = 0{,}4t_1 + 0{,}4t_2 + 0{,}2t_3$ — температура газа в «периферийной» части колошника,°С;

$t_ц = 0,2t_3+0,4t_4+0,4t_5$ — температура газа в «центральной» части колошника, °С;

$t_ц = 0,2t_1+ 0,2t_2+0,2t_3 + 0,2t_4 + 0,2t_5$ — температура газа по радиусу колошника, °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;

— расчёт показателя степени использования СО по следующему выражению:

$$ИСО = CO_2 / (CO + CO_2)\ дол.\ ед.,$$

где СО и CO_2 — содержание окиси и двуокиси углерода в колошниковом газе на выходе из печи, д.ед.;

— накопление в памяти ЭВМ 50–60 значений Кр и η_{co}, полученных вышеописанным способом;

— определение экстремума зависимости $\eta_{co} = f\ (Kp)$ (рисунок 3).

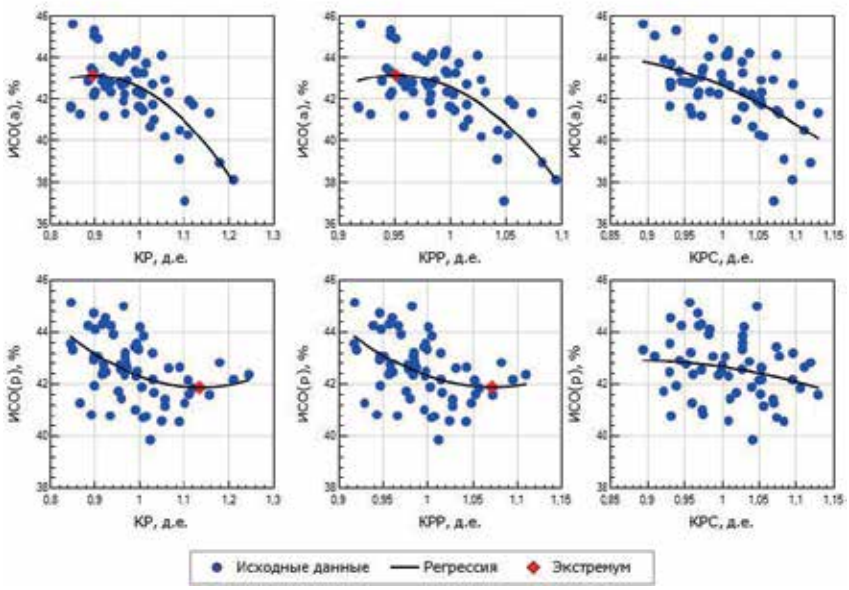


Рис. 3. Зависимость от КР, КРР, КРС ДП6 за сутки с 01.06.2016 по 31.07.2016

Используя «обратную связь», т.е. изменяя режим работы БЗУ в соответствии с данными о распределении газового потока по радиусу печи и использовании колошникового газа, необходимо добиться такого распределения материалов по радиусу печи, при котором будет достигнуто, при данных сырьевых условиях, максимальное использование восстановительной способности газового потока.

Для определения оптимального распределения газа также предложен способ с помощью термопар, устанавливаемых по периферии над уровнем засыпи. Для осуществления предложенного способа доменная печь должна быть дополнительно оборудована следующими техническими средствами:

— термопары, устанавливаемые на периферии над уровнем засыпи;

— термопары в газоотводах печи;

Перечисленные технические средства осуществляют следующие:

— непрерывный опрос показаний периферийных термопар, термопар в газоотводах печи и показаний газоанализатора;

— нахождение средних значений искомых величин за выбранный период;

— расчёт показателя распределения температуры газа по радиусу печи по выражению

$$КРС = t_{пс}/t_{кг},\ дол.\ ед.,$$

где $t_{пс}$ — среднее значение измеренных температур над уровнем засыпи, °С,

$t_{кг}$ — среднее значение измеренных температур в газоотводах печи по их вертикальным осям, °С;

— расчёт показателя степени использования СО (ИСО);

— накопление в памяти ЭВМ выбранного числа значений КРС и ИСО, полученных вышеописанным способом;

— определение экстремума зависимости ИСО = f (КРС);

— продолжение опроса показаний термопар и газоанализатора и т.д. при обработке данных с использованием РМТ

КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ШИХТЫ И ГАЗА ПО ОКРУЖНОСТИ ПЕЧИ НА КОЛОШНИКЕ

Для доменной печи, оборудованной БЗУ лоткового типа, вопрос контроля и оптимизации окружного распределения шихты занимает важное место [2, 30]. Сложность использования БЗУ лоткового типа в достижении равномерного окружного распределения шихты объясняется невозможностью контроля «замыкания колец» шихты при попадании её на поверхность ранее загруженной шихты [38] и сложным механизмом истечения материалов из бункера БЗУ при загрузке в него двух и более видов шихты, отличающихся по гранулометрическому составу и насыпному весу [39].

Предлагаемые способы регулирования окружного распределения газа с помощью БЗУ лоткового типа недостаточны эффективны. Повышение равномерности окружного распределения газа путем увеличения числа оборота лотка при выгрузке материалов в печь до 12–13 оборотов увеличивает истирание шихты при загрузке её в печь. Согласно исследований [40], содержание мелочи в железорудном материале и коксе увеличивается в 2–3 раза при загрузке шихты с помощью БЗУ по сравнению с загрузкой конусным загрузочным аппаратом. Увеличение содержания мелочи в шихте увеличивает общий перепад давления ($\Delta P_{общ}$) по высоте печи [40]. Увеличения $\Delta P_{общ}$ вынуждает уменьшать расход дутья, что ведет к снижению производительности печи.

Наиболее подходят для контроля неравномерности окружного распределения шихты периферийные термопары, установленные по периферии над уровнем засыпи. Влияние выгрузки шихты на изменение температуры газа, выходящего из периферийной части печи, изучается путем построения графиков с фиксацией величин падения температур после выгрузки железорудной части шихты в разных точках периферии печи по показаниям периферийных термопар над уровнем засыпи. Так, например, при выгрузке в 10 час. 11 мин. 28.03.2012 из-за сложного механизма истечения слоёв агломерата и окатышей из бункера БЗУ ЖРШ распределилась (рисунок 4) очень неравномерно. Тогда как, при предыдущей выгрузке ЖРШ распределилась по периферии печи практически равномерно (рисунок 5).

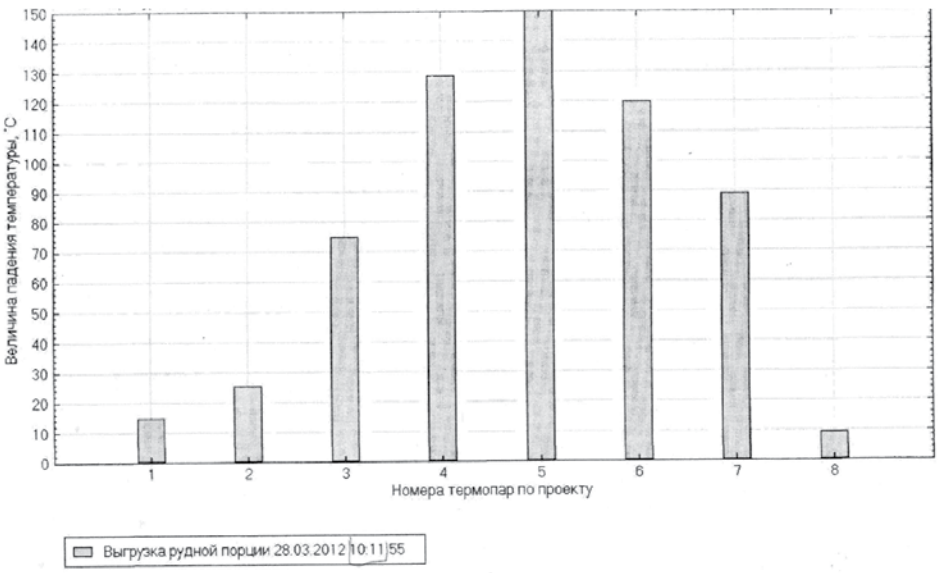


Рис. 4. Температура газа под газоотводом. Абсолютные значения изменений показаний ДП10 не в порядке реакции на выгрузку

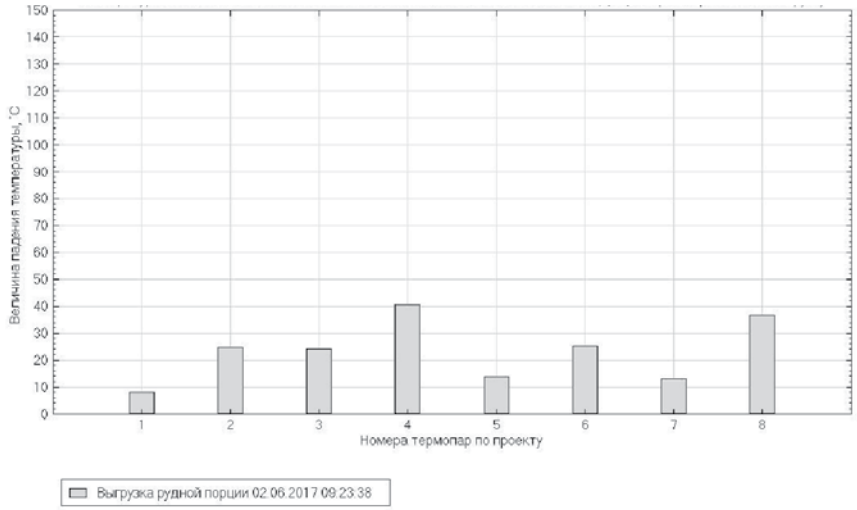


Рис. 5. Температура газа под газоотводом. Абсолютные значения изменений показаний ДП2 в порядке реакции на выгрузку

Для достижения равномерного окружного распределения шихты с помощью БЗУ с непрерывным вращением лотка необходимо проведение следующих операций:

— регистрация понижения температуры периферийных газов над уровнем засыпи после загрузки каждого вида шихтовых материалов в печь;
— сравнение их абсолютных значений между собой для каждого вида шихтовых материалов и для каждого угла наклона лотка и, в случае разницы изменений показаний у менее половины подряд стоящих термопар по сравнению с остальными в меньшую сторону, прикрывать затвор перед очередной загрузкой данного вида материала в печь; а в большую сторону — приоткрывать затвор до достижения в обоих случаях одинаковой разницы показаний всех термопар после загрузки каждого вида материалов в печь.

Внедрение данного способа позволит:

— повысить эффективность работы БЗУ лоткового типа;
— упростить конструкцию БЗУ;
— снизит его стоимость;
— упростить автоматическую систему управления БЗУ.

КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДВУМЕРНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Анализ работающих и замороженных доменных печей с помощью математических моделей подтвердил исключительную важность формы зоны плавления. Этому вопросу посвящено большое количество работ особенно в Японии и Германии [45, 46–50, 66, 71, 72, 74, 75, 77, 79, 81, 82, 95, 118, 125,126, 128, 129, 131]. В Японии при разборке замороженных печей компании «Син ниппон сэйтэцу» было показано, что форма зоны плавления оказывает существенное влияние на производительность, экономические показатели работы и длительность кампании печей [75].

Из анализа работ по инструментальному и расчетному методам контроля зоны плавления можно установить, что наиболее реальным оперативным средством её контроля являются математические модели. Контролировать зону плавления в реальном масштабе времени можно только с помощью двумерной математической модели. Двумерная математическая модель решает газодинамические, тепло- и массообменные процессы по высоте и радиусу печи. Двумерная математическая модель на ДП ПАО «ММК» [1–25] удовлетворяет необходимым требованиям и отличается от большинства других следующими основными факторами:

— учитываются газодинамические, тепло- и массообменные процессы, протекающие по высоте и сечению печи от уровня засыпи до чугунной лётки;
— в двумерной математической модели соблюдено основное условие: учет граничных условий в соответствии с граничными условиями объекта, который описывается.

Система оперативного автоматического определения зоны плавления в доменной печи в составе АСУ ТП доменных печей №№ 2, 4, 6, 9 и 10 ПАО «ММК» предназначена для совершенствования управления работой доменной печи с применением средств автоматизации, микропроцессорной, вычислительной техники и двумерной математической модели доменной плавки. Проведённые работы по созданию системы показали, что используемая двумерная математическая модель отражает протекающие в доменной печи процессы и может быть использована для контроля и управления работой печи в режиме on-line.

Целью создания системы является:
- непрерывный автоматический контроль формы зоны плавления;
- установление количественных связей зоны плавления с конечными показателями плавки;
- установление факторов, влияющих на форму зоны плавления;
- определение оптимальных значений параметров доменного процесса, характеризующих форму зоны плавления;
- разработка мероприятий по достижению оптимальных параметров доменного процесса.

Для количественной оценки параметров зоны плавления используются следующие величины:
- оценка формы: L (ФО — п) — расстояние от линии верха фурменных очагов (ФО) до линии конца зоны плавления у стенки печи, м; L(ФО — ц) — расстояние от линии верха ФО до линии конца зоны плавления в центре печи, м.;
- оценка местоположения: L(ФО — к) — расстояние от линии верха ФО до корня зоны плавления, м; $L_{ср2}$ — расстояние от линии верха ФО до линии конца 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;
- оценка толщины: $H_{ср}$ — толщина зоны плавления как среднеарифметическое трех измерений: расстояния от линии начала до линии конца плавления на периферии, в корне и на оси печи, м.

На рисунке 6 представлена зависимость производительности ДП-2 ПАО «ММК». Зависимость производительности выражена через проплав железорудных материалов (ЖРМ, $G_{рср}$, т/сутки) от параметров зоны плавления — форма (рис. 6а и рис. 6б), местоположение (рис. 6в — рис. 6д) и толщина (рис. 6е). Из этого рисунка видно, что раскрытие периферии (рис. 6а) и центра (рис. 6в) в заплечиках печи; подъём корня ЗП (рис. 6в) и линии плавления (рис. 6г) от верха фурменных очагов; увеличение разности температуры материалов на входе в фурменные очаги (t_2'') и температуры плавления ЖРМ ($t_{пл}$ = 1300°С) (рис. 6д) приводит к подъёму зоны плавления вверх по высоте печи, а увеличение толщины зоны плавления (рис. 6е) ведет к существенному снижению производительности печи (до 700 т ЖРМ/сутки).

Аналогичные зависимости получены для четырех других печей ПАО «ММК», на которых внедрена система «Когезия».

Одной из причин снижения производительности печи может быть подъём зоны плавления вверх по высоте печи. Увеличивая расстояние от верха фурменных очагов (ФО) до линии плавления на периферии (рис. 6а), в корне (рис. 6в) и на оси печи (рис. 6б) приводит к уменьшению количество ЖРМ в доменной печи. Это ведет к снижению производительности. Снижение ЖРМ выше зоны плавления при сохранении количества и нагрева газов в печи приводит к увеличению нагрева шихты и выразится в дальнейшем в увеличении содержания кремния в чугуне на выпуске. Это хорошо видно на рисунке 7. Раскрытие периферии (рис. 7а) и центра (рис. 7в) печи; подъём корня зоны плавлния (рис. 7в) и линии плавления (рис. 7г); увеличение разности температуры материалов на входе в фурменные очаги (t_2'') и температуры плавления ЖРМ (рис. 7д); увеличение толщины зоны плавления (рис. 7е) ведут к существенному росту содержания кремния в чугуне (на 0,45%).

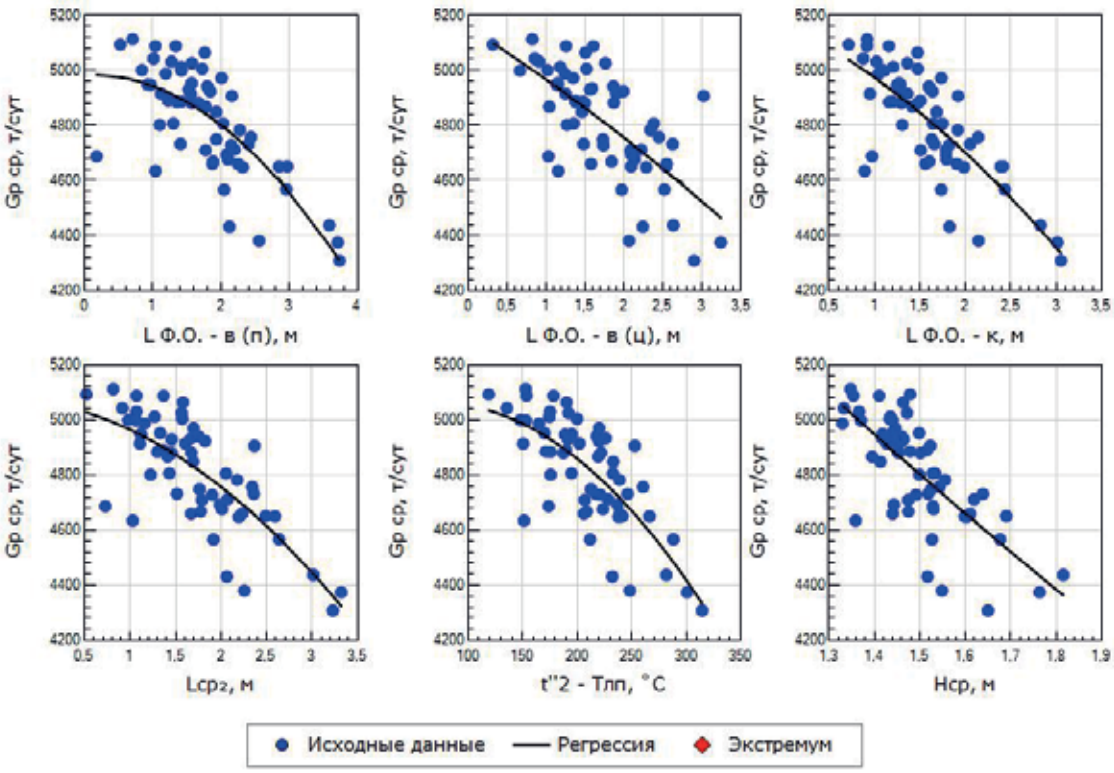


Рис. 6. Зависимость параметров работы ДП2 за сутки с 20.04.2017 по 28.06.2017

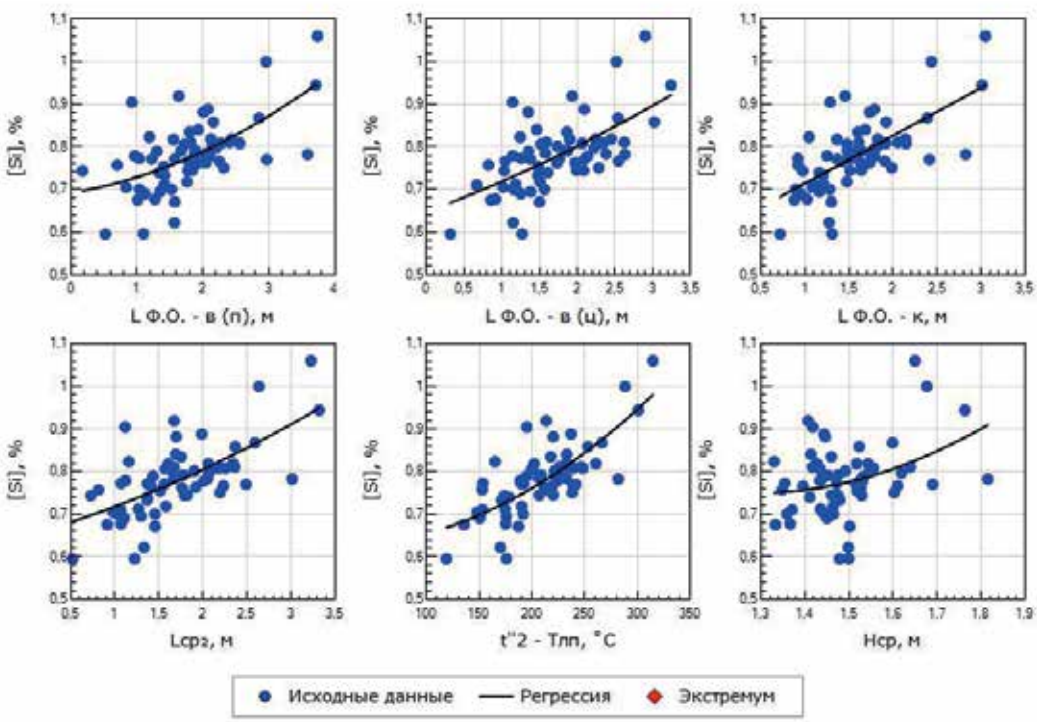


Рис. 7. Зависимость параметров работы ДП2 за сутки с 20.04.2017 по 28.06.2017

Примечание к рисункам 6 — рисунок 72: обозначения а, б, в — верхний ряд слева направо, г, д, е — нижний ряд слева направо.

Полученные данные показали, что разработанная двухмерная математическая модель позволяет:

- количественно оценивать параметры зоны плавления;
- проводить их сопоставление с конечными показателями плавки;
- находить параметры зоны плавления, при которых достигаются наилучшие показатели плавки;
- ответить на вопрос выбора параметров зоны плавления, обеспечивающих наилучшие показатели плавки.

Показано, что наилучшие показатели плавки достигаются при наименьшем открытии периферии и центра печи, при наименьшем расстоянии зоны плавления от фурменных очагов, при наименьшей ее толщине.

Полученные зависимости соответствуют общепринятым представлениям о влиянии параметров зоны плавления на конечные показатели плавки.

Исключением является — не целесообразно открывать центр печи. Изменение формы зоны плавления за счет подъёма её вершины на оси печи приводит к снижению производительности. Целесообразность открытия центра печи за счет подъёма вершины зоны плавления по 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 зоны плавления.

При использовании БЗУ и более мелкой шихте, когда кокс и агломерат (окатыши), имеющие в три раза отличающиеся насыпные плотности, загружают раздельно, имеет место выклинивание агломерата (окатышей) при попадании их на загруженный слой кокса (при загрузке печи). 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 [2]). 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. И поэтому выклинивание агломерата и особенно окатышей неизбежно.

Учитывая изложенное, можно предположить, что при дальнейшем движении слоев кокса и агломерата (окатышей) от верха печи к низу, учитывая неизбежную вибрацию, трение шихты о стенки печи, возрастающую температуру газового потока и, следовательно, усиливающееся подпирающее воздействие газового потока особенно на коксовые частицы, происходит просыпание кусков агломерата (особенно мелких) и окатышей через взвешенные куски кокса. Поэтому к моменту плавления ЖРМ слои агломерата (окатышей) и кокса окончательно перемешиваются и форма зоны плавления уже не оказывает влияния на сопротивление проходу газов через неё.

Возможность непрерывной автоматической количественной оценки параметров зоны плавления позволяет контролировать их в различные периоды работы печи. Непостоянство параметров зоны плавления приводит к существенному снижению показателей эффективности работы печи. В качестве примера снижения показателей плавки из-за непостоянства параметров зоны плавления можно привести данные о работе печи при существенном увеличении содержания окатышей в шихте без изменения приёмов управления режима работы БЗУ.

То, как влияет неконтролируемое изменение распределения окатышей по сечению печи на работу доменной печи и особенно на зону плавления при увеличении окатышей в шихте, можно видеть из рисунков 8–12. Из рисунка 8 (чёрная линия) видно, как изменяется содержание окатышей в шихте за три периода работы печи. Хотя параметры работы БЗУ оставались прежними, распределение окатышей по сечению печи изменилось. Это привело к существенному изменению формы и местоположения зоны плавления (рисунок 9). Из этого рисунка видно, что произошло раскрытие периферии (коричневая линия) и особенно центра печи (синяя линия); подъём зоны плавления вверх по высоте печи (зелёная линия). Это хорошо также видно из рисунков 10–12, на которых представлены характерные формы зоны плавления в первый, второй и третий периоды работы печи.

Полученные данные показали, что разработанная двухмерная математическая модель позволяет количественно оценивать параметры зоны плавления, проводить их сопоставление с конечными показателями плавки (производительность печи и удельный расход кокса) и находить параметры зоны плавления, при которых достигаются наилучшие показатели плавки.

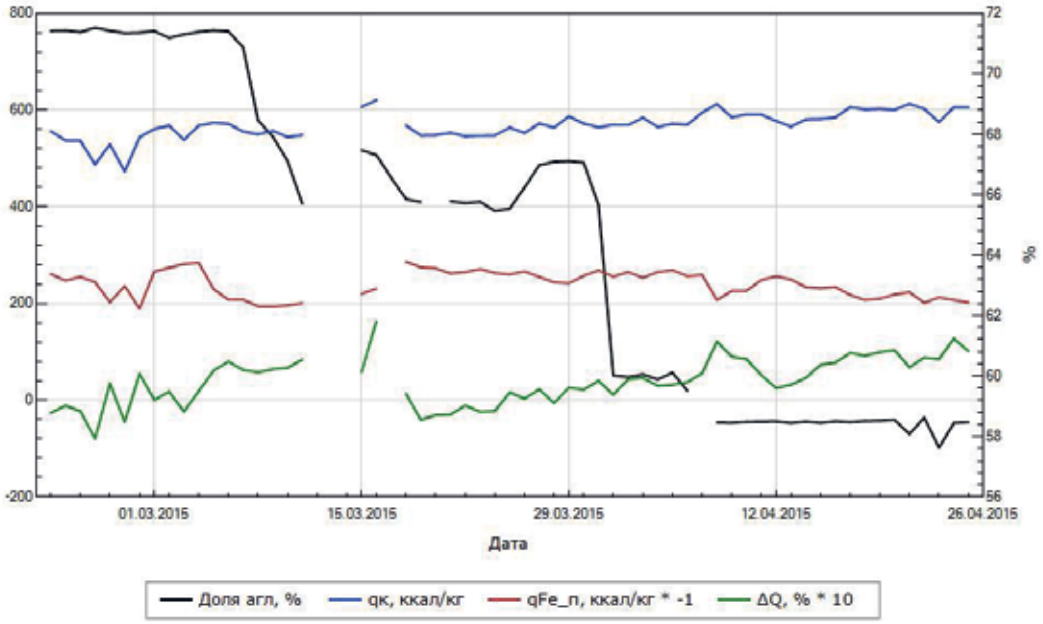


Рис. 8. Тренды параметров МТБ ДП2 (сутки) с 22.02.2015 по 26.04.2015

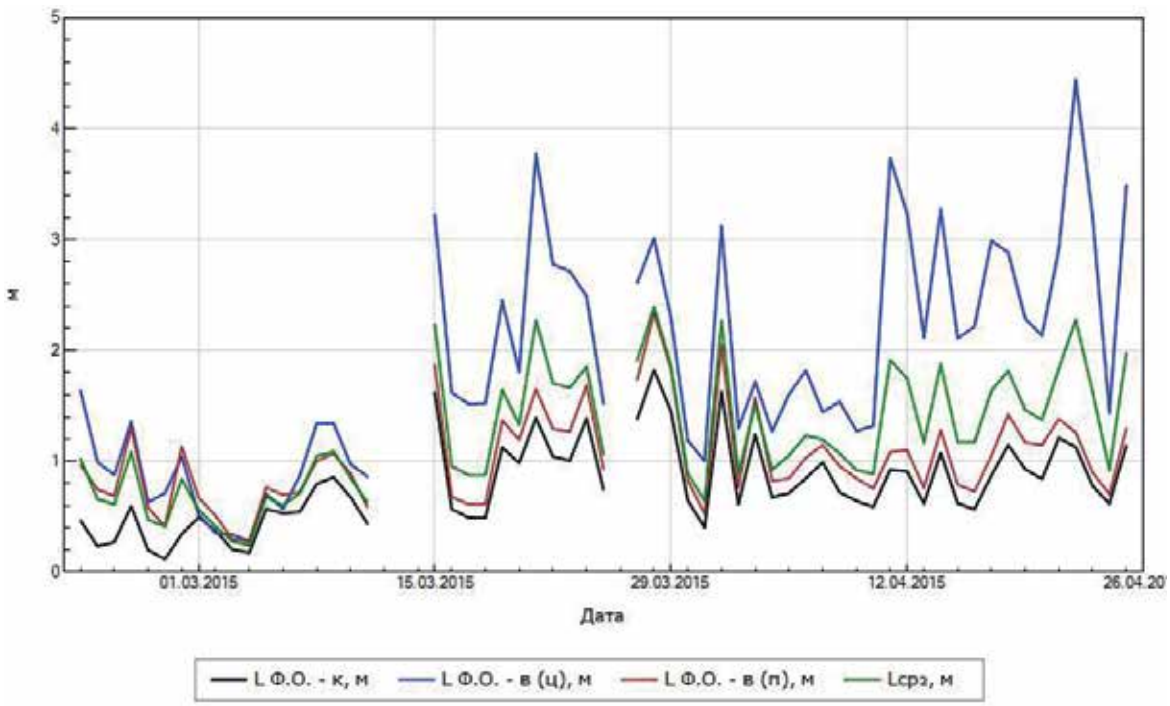


Рис. 9. Тренды параметров расчета зоны плавления ДП2 (сутки) с 22.02.2015 по 26.04.2015

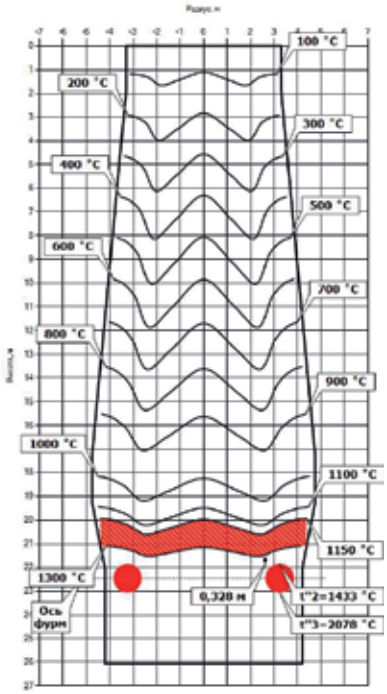


Рис. 10. Поля изотерм материалов ДП2 за сутки (05.03.2015 00:00 — 06.03.2015 00:00)

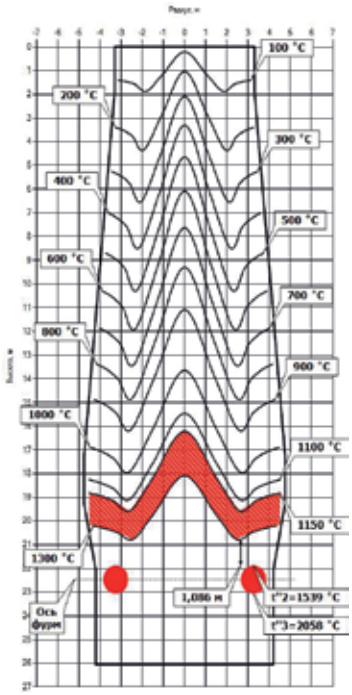


Рис. 11. Поля изотерм материалов ДП2 за сутки (21.03.2015 00:00 — 22.03.2015 00:00)

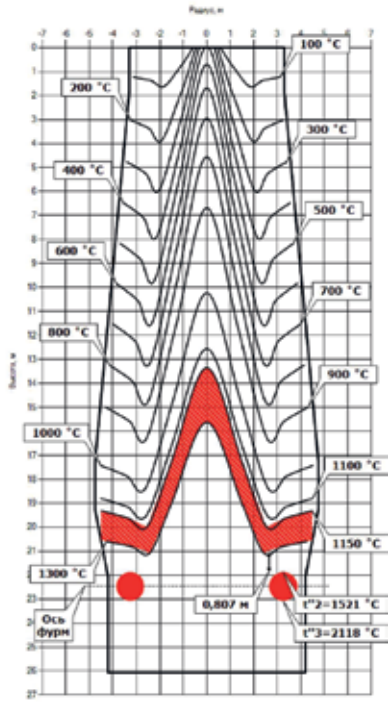


Рис. 12. Поля изотерм материалов ДП2 за сутки (11.04.2015 00:00 — 12.04.2015 00:00)

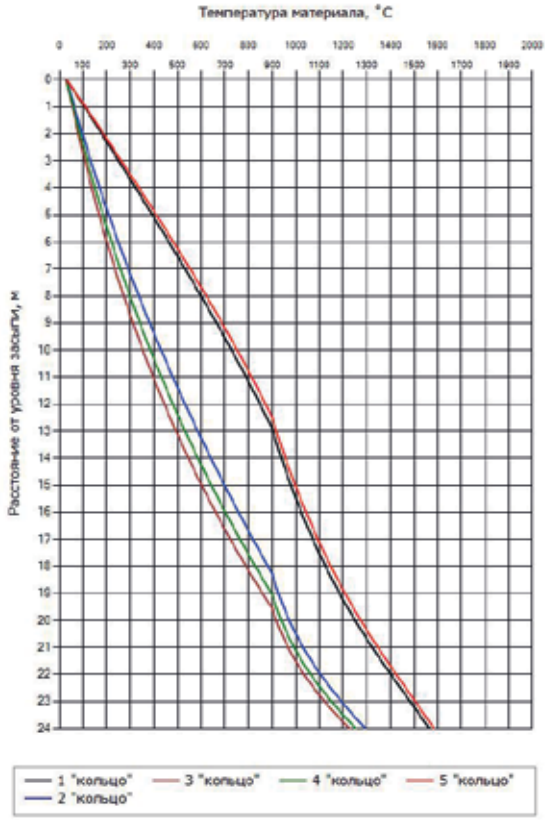


Рис. 13. Изменение температур материалов по высоте ДП10 за выпуск (между окончаниями) (21.06.2017 02:00 (1437) 21.06.2017 03:50)

НЕПРЕРЫВНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ МАТЕРИАЛОВ И ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ, ПРИМЫКАЮЩИХ К КЛАДКЕ В НИЖНЕЙ ЧАСТИ ШАХТЫ, В РАСПАРЕ И В ЗАПЛЕЧИКАХ ПЕЧИ

Двухмерная математическая модель за каждый «выпуск» и сутки представляет результаты расчетов распределения температур по высоте каждого из пяти равновеликих по объёму колец от уровня засыпи до верхней границы фурменных очагов (рисунок 13). Температура материалов и продуктов плавки, примыкающих к кладке печи от уровня засыпи до фурменных очагов может быть принята расчетная — температура первого (от стенки печи) кольца. Эта температура может использоваться для выбора режима работы распределительных механизмов шихты БЗУ.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ФОРМЫ ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЫКАЮЩИХ К КЛАДКЕ ПЕЧИ, ДЛЯ ВЫБОРА РЕЖИМА РАБОТЫ БЗУ

В настоящее время ставятся три основные задачи к доменному производству — повышение производительности, снижение расхода технологического топлива, повышение длительности кампании печи. Этим трём задачам должны соответствовать все мероприятия, направленные на управление доменной плавкой, в т.ч. и управление работой БЗУ при загрузке шихты в доменную печь.

Выбор режима работы БЗУ для достижения поставленных задач должен проводиться, используя «обратную связь», т.е. контроль за предложенными параметров, которые могут быть критериями для выбора режима работы БЗУ, а именно:

- температура газа на выходе из шихты в различных точках радиуса и окружности печи после выгрузки материалов из бункера БЗУ;
- степень использования CO;
- значения параметров зоны плавления (форма, толщина, высота расположения);
- значения температуры материалов и продуктов плавки в периферийной зоне нижней части шахты, распара и заплечиков печи.

Рекомендации по повышению эффективности использования БЗУ следует разделить на два взаимосвязанные направления:

- оперативное управление для повышения эффективности работы печи;
- стратегическое управление для увеличения длительности компании печи.

ЗАДАЧИ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ БЗУ

Для оперативного управления работой БЗУ необходимо использовать критерии, основанные на следующих параметрах работы доменной печи:

- радиальное газораспределение (РГР) на колошнике;
- окружное газораспределение (ОГР) на колошнике;
- параметры формы зоны плавления.

Контроль и сопоставление РГР и состава общего колошникового газа позволят находить [8] оптимальное радиальное газораспределение, при котором достигается максимальное использование восстановительной способности газового потока (ИСО) (рис. 3) и, как следствие, наилучшая подготовка ЖРМ перед их плавлением.

Контроль ОГР позволит находить [8] степень равномерности распределения ЖРМ по окружности колошника печи при загрузке их в печь. Влияние выгрузки шихты из БЗУ на изменение температуры газа, выходящего из периферийной части печи, контролируется путем построения графиков с фиксацией величин падения температур после выгрузки ЖРМ в разных точках периферии печи по показаниям периферийных термопар, установленных над уровнем засыпи (рис. 4 и рис. 5).

Регулярный автоматический контроль и количественная оценка параметров зоны плавления (ЗП) в реальном масштабе времени позволит находить [9] параметры ЗП, сопоставлять их с конечными показателями плавки и находить значения параметров, обеспечивающих наилучшие показатели плавки. Из представленных на рис. 6 данных видно, что увеличение численных значений всех параметров ЗП ведет к существенному снижению производительности печи. Следовательно, они (особенно параметры, характеризующие открытие периферии (рис. 6а) и центра (рис. 6б) печи) являются критериями для выбора режима работы БЗУ.

ЗАДАЧИ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ БЗУ

Стратегическое управление работой БЗУ должно быть направлено на повышение длительности кампании доменной печи за счет повышения стойкости её кладки. Для достижения поставленной цели необходимо выделить факторы, этому способствующие. Анализ имеющихся данных по этому вопросу показывает, что стойкость кладки в районе заплечиков, распара и нижней части шахты печи зависит от следующих факторов:

— температуры материалов и продуктов плавки в этом районе печи;

— содержания FeO в первичном шлаке.

За температуру материалов и продуктов плавки в заплечиках печи можно принять температуру материалов на входе в фурменные очаги (t_2") Экспериментально показано [8, 9], что на каждой доменной печи имеется оптимальное значение этой температуры (рисунок 14 и рисунок 15). Так, например, для ДП-6 ПАО «ММК» при превышении значений t_2" ≈ 1540 °С наблюдалось падение производства (рисунок 15а, рисунок 15б и рисунок 15в), а при превышении значений t_2" ≈ 1580 °С наблюдался рост удельного расхода кокса (рисунок 15г, рисунок 15д и рисунок 15е). Повышение t_2" выше оптимальных значений ведет не только к снижению производства и увеличению расхода кокса, но и к ухудшению условий службы кладки в этом районе печи.

За температуру материалов в распаре и нижней части шахты можно принять температуру материалов первого кольца (от стенки печи) распределения температуры материалов по высоте пяти колец от уровня засыпи до ФО (рисунок 13). Данная температура определяется в системе «Когезия». Абсолютные значения температуры по высоте первого кольца напрямую зависят от работы БЗУ. Поэтому температура материалов и продуктов плавки, примыкающих к кладке печи в районе заплечиков, распара и нижней части шахты печи, является ещё одним критерием управления работой БЗУ.

В последнее время появилось мнение, что большое количество FeO в первичном шлаке, кроме создания трудностей при прохождении его через коксовую насадку, оказывает вредное воздействие на кладку печи. Работами С.В. Шаврина с сотрудниками [10] показано, что наилучшие условия для прохождения образовавшегося первичного шлака через коксовую насадку без нарушений в работе печи создаются при содержании FeO не выше 10% перед плавлением. Вывод: роль газодинамических, восстановительных и тепловых процессов в «шахте» печи состоит также в том, чтобы провести их так, чтобы содержание FeO в ЖРМ перед их плавлением не превышало ≈ 10%. Оптимальное радиальное газораспределение, обеспечившее максимальное использование восстановительной энергии газового потока и снижение вследствие этого содержание FeO в первичном шлаке, является ещё одним критерием управления работой БЗУ.

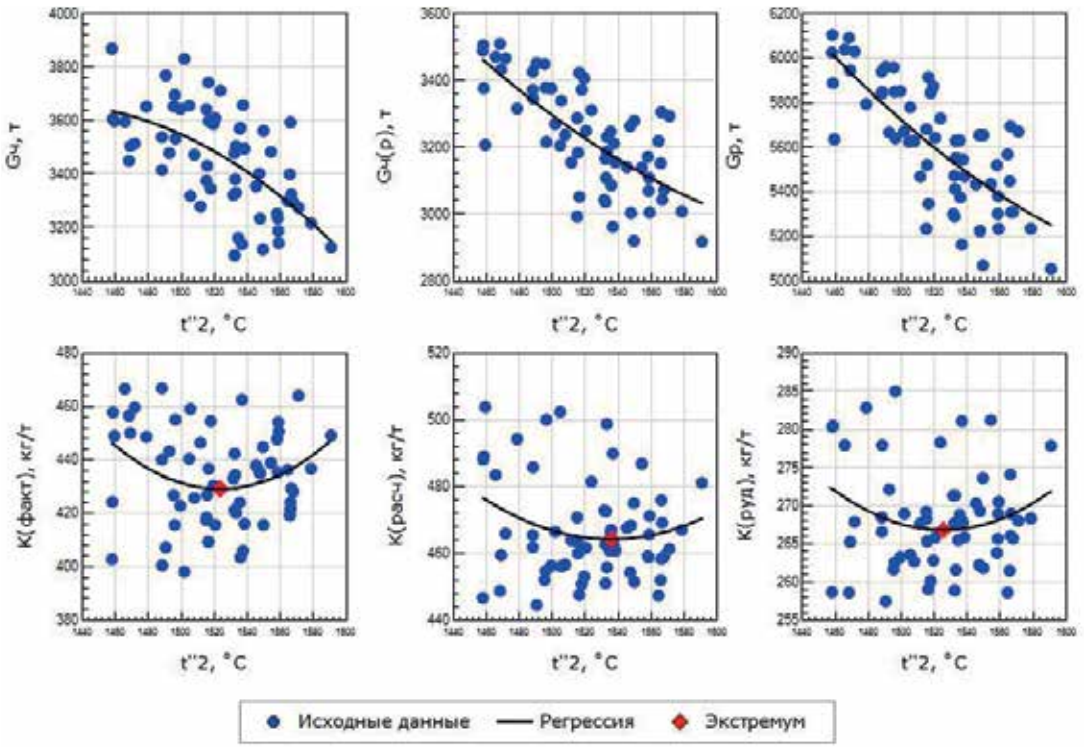


Рис. 14. Зависимость параметров работы ДП4 от температуры материалов на входе в фурменные очаги за сутки с 20.04.2017 по 28.06.2017

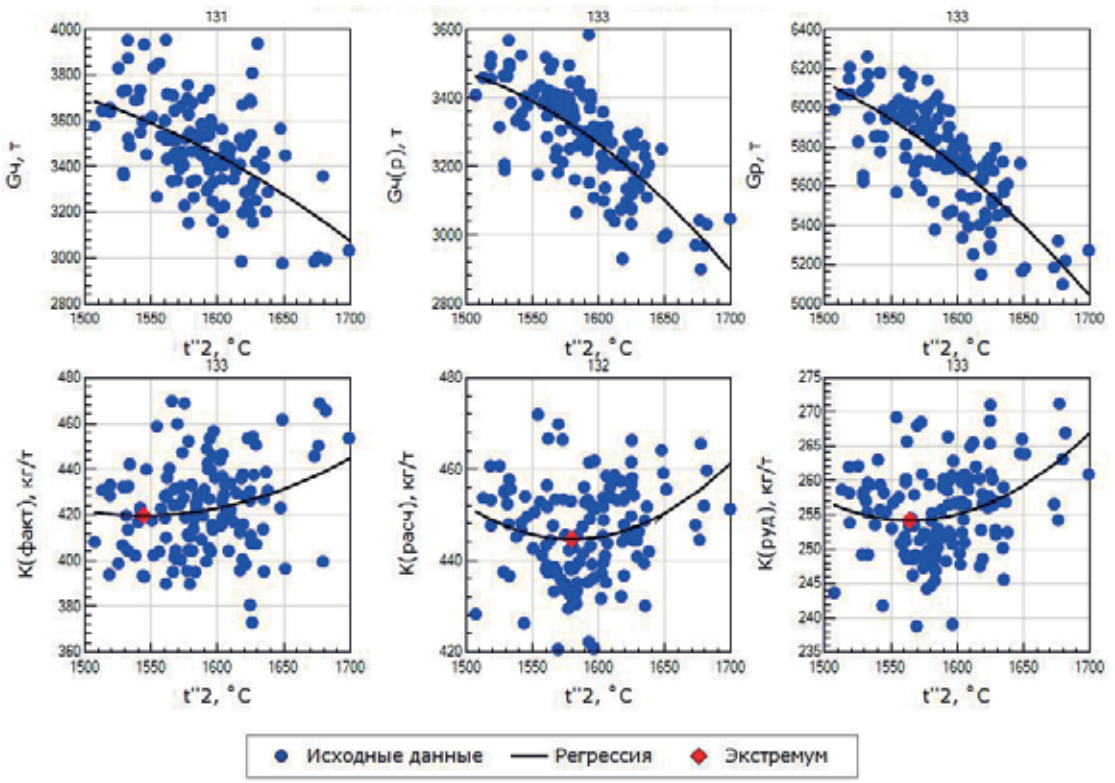


Рис. 15. Зависимость параметров работы ДП6 от температуры материалов на входе в фурменные очаги за сутки с 01.06.2017 по 01.11.2017

На содержание FeO в первичном шлаке влияет:

1. Подготовка ЖРМ к плавке и их тепловая обработка, обеспечивающая, с одной стороны, хорошую прочность, с другой — хорошую восстановимость. При использовании одновременно агломерата и окатышей в шихте доменных печей одна из целей подбора ЖРМ — обеспечение одинаковых или близких температур начала и конца плавления обоих видов ЖРМ;
2. Загрузка ЖРМ и кокса на ленту транспортера на шихтоподаче и траспортера подачи шихты на колошник (при наличии такого на печи);
3. Загрузка ЖРМ и кокса в бункер БЗУ;
4. Выгрузка ЖРМ и кокса из бункера БЗУ в печь для достижения с помощью изменения режима работы БЗУ максимального использования восстановительной энергии газового потока (рисунок 3) и максимального снижения содержания FeO в ЖРМ. Добиться этого можно максимально используя восстановительную способность газового потока, используя для этого экстремум зависимости ИСО = *f* (КР);
5. Контроль и управление газодинамическими, восстановительными и тепловыми процессами в «шахте» печи с целью достижения их оптимальных значений;
6. Контроль и управление параметрами ЗП в доменной печи, особенно характеризующими её форму, с целью достижения их оптимальных значений.

ВЫВОДЫ

1. Полученные данные о влиянии на работу доменной печи радиального и окружного газораспределения и параметров зоны плавления позволили по новому рассмотреть вопрос формирования рекомендаций по выбору режима работы БЗУ для повышения эффективности работы доменной печи и увеличения длительности её кампании. БЗУ является мощным инструментом, направленным на повышение эффективности работы доменной печи и длительности её кампании.
2. Управление режимом работы БЗУ «без обратной связи», не используя оперативных критериев работы доменной печи, часто не позволяет эффективно использовать преимущества этого аппарата, приводя к потерям производства.
3. Оперативное управление работой БЗУ, направленное на повышение эффективности работы доменной печи, должно проводиться с обратной связью, реагируя на изменения следующих критериев работы доменной печи: оптимизацию радиального газораспределения на колошнике печи; минимизацию окружного газораспределения на колошнике печи; оптимизацию формы и местоположения зоны плавления в заплечиках печи; контроль и управление температурой материалов и продуктов плавки, примыкающих к кладке печи в заплечиках, распаре и нижней части шахты печи.
4. Стратегическое управление работой БЗУ должно проводиться, реализуя целевые функции, направленные на повышение длительности её кампании с использованием следующих критериев работы доменной печи: минимизация содержания FeO в первичном шлаке; оптимизация температуры материалов и продуктов плавки, примыкающих к кладке печи в районе заплечиков, распара и нижней части шахты печи.

Список литературы

1. Доброскок В.А. Специальные системы загрузки доменных печей // «Черные металлы», сентябрь 2007. С. 13–21.
2. Рылов И.А., Шмонин М.М., Макарычев В.А. и др. Система автоматического контроля распределения газового потока по сечению шахты доменной печи. Металлург, 1980. № 6. С. 9–11.
3. Гришкова А.А., Френкель М.М., Вегман Е.Ф. Управление загрузкой доменных печей. М., 1981. — 26 с. (Черная металлургия. Сер. «Автоматизация металлургического производства»: Обзорная информация / Институт Черметинформация: Вып. 4).

4. Шумилов К.А., Микрюков Б.Г. Автоматизация доменного производства. — Киев. Техника, 1981. — 123 с.
5. Покрышкин В.Л., Большаков В.И., Хомич И.Т. и др. Особенности распределения материалов в доменной печи объёмом 5000 м³ с бесконусным загрузочным устройством. Сталь. 1982, № 11, с. 13–16.
6. Большаков В.И., Покрышкин В.Л., Шутылев Ф.М. Совершенствование способов загрузки доменных печей в СССР и за рубежом. М., 1983. — 33 с. (Черная металлургия. Сер. «Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна»: Обзорная информация / Институт Черметинформация: Вып. 2).
7. Калинин А.П., Антипов Н.С., Кошель В.Ф. и др. Опыт применения ЭВМ для контроля технологическим процессом на доменной печи. Черная металлургия. Бюл. института Черметинформация. 1984. № 1. С. 55–61.
8. Большаков В.И., Покрышкин В.Л., Шутылев Ф.М. Оптимизация программы загрузки доменной печи лотковым распределителем // Сталь. 1985. № 9. С. 16–20.
9. Большаков В.И., Зарембо П.Ю. Траектории движения шихты в колошниковом пространстве современной доменной печи // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация», 1985. — Вып. 20(1000). — С. 35–37.
10. Тараканов А.К., Гринштейн Н.С., Байрака М.Н. и др. Автоматизированный выбор режима загрузки доменной печи с загрузочным устройством лоткового типа. Сталь. — 1985. — № 5. С. 11–16.
11. Большаков В.И. Научное обоснование стратегии управления распределением шихты при использовании БЗУ // Сталь. — 2002. — № 4. — С. 37–42.
12. Большаков В.И., Гладков Н.А., Шулико С.Т. и др. Исследование теоретических основ распределения шихтовых материалов в доменной печи. Сталь. 2002, № 12, с. 5–10.
13. Большаков В.И., Шутылев В.М., Лебедь В.В. Инженерная методика расчета показателей распределения шихты для доменных печей, оснащенных безконусными загрузочными устройствами // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2006. — № 2. — С. 76–80.
14. Большаков В.И. Опыт освоения и совершенствования режимов загрузки доменных печей, оснащенных бесконусными загрузочными устройствами. Труды III международного конгресса доменщиков. Украина, Ялта. 04-08.10.2010, с. 132–142.
15. Паршаков В.М., Бабушкин Н.М., Тимофеев В.Н. Изучение скорости движения материалов в верхней части доменной печи. «Теплотехника доменного и агломерационного процессов». «Металлургия». М., 1966, с. 306–312.
16. Паршаков В.М., Бабушкин Н.М., Боковиков Б.А. и др. Количество и распределение газового потока в доменной печи и его влияние на показатели плавки. «Сталь», 1971, № 12, с. 1069–1074.
17. Паршаков В.М., Бабушкин, Тимофеев В.Н. Разработка метода контроля распределения газового потока по радиусу печи. «Теплотехника доменного и агломерационного процессов». «Металлургия». М., 1966, с. 292–305.
18. В.М. Паршаков. Автоматизированная система оптимизации доменной плавки. «Сталь», 2004, № 3, с. 7–13.
19. Большаков В.И. Теория и практика загрузки доменных печей. М.: Металлургия, 1990. — 255 с.
20. Загайнов С.А., Филатов С.В., Филиппов В.В. 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.
21. Гуденау Г.В., Крайбих К., Номия Е. Влияние пластичной зоны на распределение газового потока в доменной печи // Черные металлы. 1979. № 22. С. 7–13.
22. 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.
23. Изменение высоты зоны плавления в зависимости от теплового состояния доменной иечи / Есия Судзуки и др.; ВЦП — № Ц — 86209 — Тэцу то хаганэ, 1975, т. 61, № 4, с. 23.
24. Хосидэ Й., Такаги С., Юномура А. Совершенствование технологии доменной плавки в Японии // Черные металлы. 1980. № 25/26. С. 3–7. 20.
25. Паршаков В.М., Боковиков Б.А., Шкляр Ф.Р. Математическая модель процессов тепло — и массообмена в фурменных очагах доменной печи. «Проблемы автоматизированного управления доменным производством». Киев, 1977, с. 18.

26. Паршаков В.М., Шкляр Ф.Р., Голубков О.Л.. 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.
27. 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.
28. Паршаков В.М., Федотов П.Б., Боковиков Б.А., Шкляр Ф.Р. Модель процессов в фурменных очагах доменной печи. «Производство чугуна». Межвузовский сборник. Издание УПИ. Свердловск, 1981, с. 42–47.
29. Паршаков В.М. 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.
30. Паршаков В.М., Каширская Т.Ю., Шкляр Ф.Р., Боковиков Б.А. и др. Упрощенная модель доменной плавки. «Проблемы автоматизированного управления доменным производством». Выпуск 6. ЦНИИТЭ Приборостроения. М., 1983, с. 26.
31. Паршаков, Ю.В. Яковлев, Г.П. Лежнев и др. Способ теплового регулирования доменной печи. Авторское свидетельство СССР на изобретение № 1246603, 1986 г.
32. 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.
33. 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.
34. В.М. Паршаков, А.А. Полинов, А.В. Павлов и др. Контроль и оптимизация параметров зоны плавления с помощью двумерной математической модели в составе АСУ ТП доменной печи. «Металлург», 2017, № 7, с. 30–36.
35. В.М. Паршаков, А.А. Полинов, А.В. Павлов и др. Внедрение на доменных печах ПАО «ММК» автоматизированной системы контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки. «Металлург», 2017, № 8, с. 40–46.
36. А.А. Третяк, В.М. Паршаков, В.А. Борисенко. Выбор режима работы БЗУ с использованием данных о газораспределении на колошнике и форме зоны плавления в нижней части печи. «Металлург», 2017, № 11.
37. В.М. Паршаков, А.А. Третяк, А.А. Полинов 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. Металлургия чугуна — вызовы XXI века. Труды VIII Международного конгрессов доменщиков. — М: Издательский дом «Кодекс», 2017. — С. 328–341.
38. В.М. Паршаков, А.В. Чевычелов, А.А. Полинов и др. Внедрение непрерывного автоматического контроля радиального газораспределения в доменных печах. Труды Международного конгресса по агло-коксо-доменному производствам. Украина, Ялта, 2013, с. 358–375.
39. 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 по агло-коксо-доменному производствам. Украина, Ялта, 2013, с. 376–385.
40. В.А. Борисенко, В.М. Паршаков, А.А. Третяк. Управление работой БЗУ с использованием данных о параметрах зоны плавления в доменной печи с целью повышения её эффективности работы и длительности кампании. Сборник трудов международного союза доменщиков. Выпуск 1. 2017. М., С. 42–48.
41. П.Ю. Довженко, А.В. Краснобаев, А.П. Уланов, Д.А. Шнайдер. Мероприятия для реализации системы «Когезия» в составе действующей или создаваемой АСУ ТП доменной печи. Сборник трудов международного союза доменщиков. Выпуск 1. 2017. М., С. 48–53.

42. В.М. Паршаков, А.А. Полинов, А.В. Павлов и др. Непрерывный автоматический контроль параметров зоны плавления с помощью двумерной математической модели, функционирующей в реальном масштабе времени в составе АСУ ТП ДП-2 и ДП-10 ОАО «ММК». Сборник трудов международного союза доменщиков. Выпуск 1.2017. М., С. 54–69.
43. В.М. Паршаков, А.А. Полинов, А.В. Павлов и др. Порядок проведения операций по достижению оптимальных значений параметров зоны плавления и наилучших показателей плавки. Сборник трудов международного союза доменщиков. Выпуск 1. 2017. М., С. 69–75.
44. Петерс К. Х., Пот Г., Петерс М. Исследование причин нарушения газопроницаемости в доменной печи // Черные металлы. 1986. № 22. С. 10–22.
45. Паршаков В.М., Полинов А.А., Павлов А.В. и др. Внедрение на доменных печах ПАО «ММК» автоматизированной системы контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки. «Металлург», 2017, № 8, с. 40–46.
46. Паршаков В.М., Полинов А.А., Павлов А.В. и др. Контроль и оптимизация параметров зоны плавления с помощью двумерной математической модели в составе АСУ ТП доменной печи. «Металлург», 2017, № 7, с. 30–36.
47. С.В. Шаврин, И.Н. Захаров, Б.В. Ипатов. Истечение шлака через насадку в противотоке газа. Известия ВУЗов, ЧМ, 1962, № 9, с. 54–65.

В.М. Паршаков, ООО «АКОММ»
А.А. Полинов, Д.А. Шнайдер, И.Е. Прохоров, А.В. Павлов, А.В. Колосов, Д.И. Селезнев, П.Ю. Довженко, ПАО «ММК»
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОЦЕНКИ ГАЗОДИНАМИКИ, МАССО- И ТЕПЛООБМЕНА И ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ ПАО «ММК» И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

ВВЕДЕНИЕ

С использованием аналитических и экспериментальных исследований с 2006 года на ПАО «ММК» внедряется «Автоматизированная система контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки» (АСКОП ДП). Система АСКОП ДП позволяет на восьми доменных печах ПАО «ММК» с помощью математических моделей контролировать и оптимизировать процессы газодинамики, массо- и теплообмена и плавления.

Таблица 1. Автоматизированная система контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки

Наименование групп систем	Наименование локальных систем	№ печи на ММК	Год внедрения на ММК
1. КОНТРОЛЬ	1.1) радиального газораспределения на колошнике	2, 4, 6, 9, 10	2006
	1.2) окружного газораспределения на колошнике	2,10	2011
	1.3) окружного газораспределения в горне	2	2011
	1.4) материального и теплового балансов плавки	2; 10; 4, 6, 9	2013; 2016; 2017
	1.5) нагрева «шахты» и горна печи	все печи	2008
	1.6) параметров зоны плавления	2; 10; 4, 6, 9	2014; 2016; 2017
2. ОПТИМИЗАЦИЯ	2.1) газодинамического режима плавки	все печи	2008
	2.2) радиального распределения на колошнике	2, 4, 6, 9, 10	2011
	2.3) окружного газораспределения на колошнике	2, 10	2011
	2.4) окружного газораспределения в горне печи	2	2011
	2.5) восстановительных процессов плавки	2; 10; 4, 6, 9	2013; 2016; 2017
	2.6) теплового состояния печи	все печи	2009
	2.7) параметров зоны плавления	2;10; 4,6,9	2014; 2016; 2017
3. ПРОГНОЗ	3.1) прогноз нагрева горна печи	2	2011
	3.2) прогноз нагрева шахты печи	10	2017

В АСКОП ДП используются следующие математические модели (ММ):

- тепло-массообмен от уровня засыпи до фурменной зоны (модуль «Шахта») [1–2];
- газодинамические, тепло-массообменные процессы в двух нижних зонах: от фурменных очагов до формирования продуктов плавки (модуль «Горн») [3–10];
- одномерная модель газодинамических, тепло- и массообменных процессов по высоте печи от уровня засыпи до чугунной летки (модуль «Домна») [11–12];
- радиально равномерный двухступенчатый теплообмен в пяти равновеликих по объему осесимметричных частях шахты. На входе в модуле «Горн» определяется балансовая температура газов, выходящая из фурменных очагов, на выходе температура газа, определяемая с помощью радиальных многоточечных термопар (модуль «Радиус») [11, 13];
- двумерная математическая модель (ДММ) созданная с использованием модулей «Шахта», «Горн», «Домна» и «Радиус» [11, 14–16]. ДММ рассчитывает в реальном масштабе времени распределение температур материалов и газов по высоте каждого кольца и положение зоны плавления. Зона плавления — это пространство между двумя изотермами: начала и конца плавления железорудной части шихты [11, 16–19].

Для проверки адекватности модуля «Горн» и адаптации к реальным условиям плавки проводились исследования по зондированию фурменных очагов ДП-9 и ДП-6 ПАО «ММК» [20–24]. Получили формулу определения протяженности фурменных очагов [20, 22] и данные о действительной температуре газа в фурменных очагах [23]. С помощью модуля «Горн» рассчитывается температура материалов на входе в фурменные очаги (*t*''2) и балансовая температура газов на выходе из них (T"3). Данные значения температур являются граничными условиями для расчета теплообмена в шахте печи.

Теплообмен в «Шахте» печи рассматривается как радиально неравномерный двухступенчатый теплообмен в противотоке с постоянными теплоемкостями потоков шихты и газов на каждой из двух

ступеней. Для этого шахту делят на пять равновеликих по объему осесимметричных частей, на выходе из которых известна температура газа, определяемая с помощью радиальных многоточечных термопар. Количество газа и шихтовых материалов в кольцевых частях находят решением системы уравнений потери напора, теплового и материального балансов для первой зоны теплообмена от уровня засыпи до положения изотермы температуры начала реакций прямого восстановления [13]. Из уравнений теплового баланса второй зоны (аналогичное для первой и отличающееся только 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.

Использование математических моделей позволило решать в реальном масштабе времени следующие технологические задачи:

- непрерывный автоматический контроль параметров плавки (таблица 1, п.1);
- количественная оценка параметров плавки и выявление их влияния на конечные показатели плавки;
- выбор комплексных параметров по направлениям (газодинамика, массообмен, теплообмен и плавление), оказывающих наибольшее влияние на конечные показатели плавки;
- использование конечных показателей для оптимизации доменной плавки (таблица 1, п. 2) и ее непрерывного контроля;
- прогноз изменения наиболее ответственных параметров плавки (таблица 1, п. 3) и формирование рекомендаций для предотвращения расстройств печи;
- представление информации о работе одной и всех доменных печей цеха в удобном графическом и табличном виде.

1. КОНТРОЛЬ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГАЗОДИНАМИКИ

Определены комплексные параметры процессов газодинамики в доменной печи:
- количество газового потока, проходящего через столб шихтовых материалов (*V*кг, м³/мин.);
- распределение газового потока по радиусу печи на колошнике;
- количественная оценка газового потока — коэффициенты КР, КРР и КРС;
- распределение газового потока по окружности печи на колошнике;
- количественная оценка влияния выгрузки шихты на окружное распределения газового потока.

1.1. Определение оптимального количества газа для конкретных условий плавки

Для различных сырьевых и эксплуатационных условий плавки существует определенное количество газа, которое можно пропустить через столб шихтовых материалов без нарушения его устойчивости [24–29]. При этих условиях обеспечивается максимальную производительность печи или минимальный расход кокса. На рисунке 1а, рисунке 1б и рисунке 1в представлены зависимости фактического (*G*ч, т/сут.) и расчетного (*G*ч(р), т/сут.) производства чугуна, проплава железорудных материалов (*G*р, т ЖРМ/сут.) и отнесенного к ним расхода кокса и расхода холодного дутья (РХД, м³/мин). Исследования показали, что наиболее устойчивые зависимости от расхода дутья проявляются между расходом железорудных материалов и отнесенного к нему расхода кокса. Критериями оптимизации могут быть или минимальный расход кокса, или максимальная производительность печи (рисунок 1).

Выбор критерия оптимизации осуществляется руководством цеха. Результаты сравнения текущего и оптимальных значений расхода дутья в системе формируются и выдаются на экран монитора.

Тип рекомендаций: *«Для достижения минимального расхода кокса расход дутья уменьшить на 130 м³/мин» или «Для достижения максимальной производительности печи расход дутья увеличить на 100 м³/мин».*

Результаты определения оптимального количества дутья для всех печей цеха и меры, необходимые для его достижения, представлены в таблице 2.

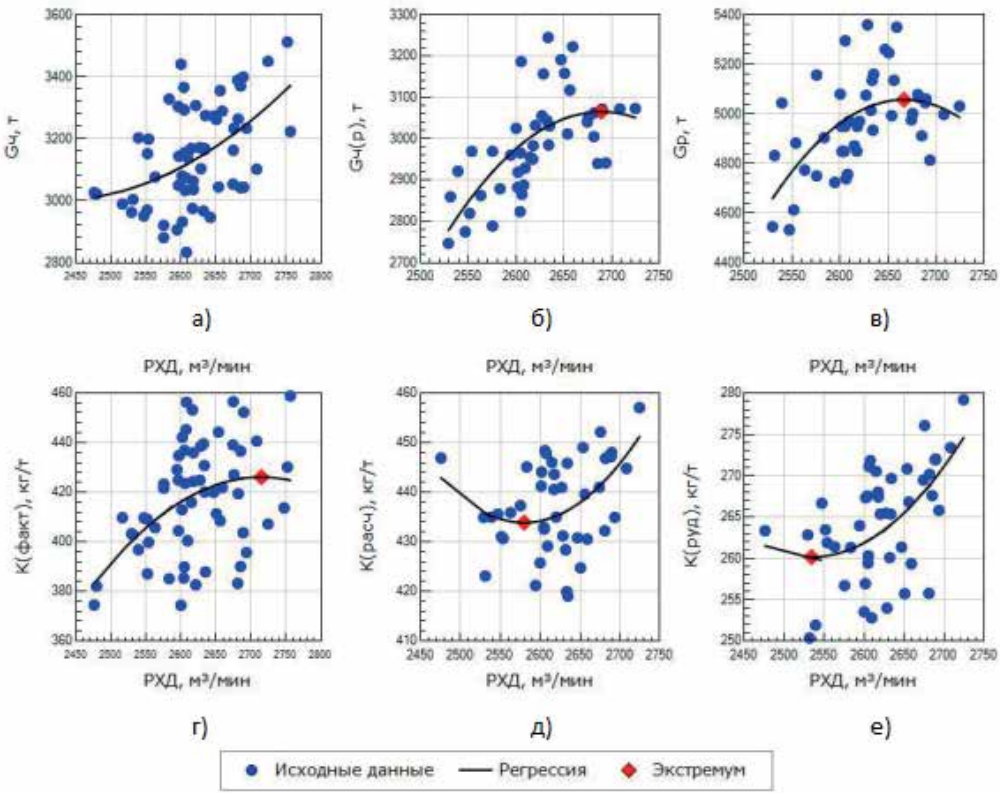


Рис. 1. Зависимость параметров работы ДП8 за сутки с 20.04.2017 по 28.06.2017

Таблица 2. Оптимальные значения расхода холодного дутья (РХД) на доменных печах по проплаву ЖРМ и по расходу кокса за сутки (22.07.2018 00:00 — 23.07.2018 00:00)

№ печи	Оптимальные значения РХД, м³/мин		Текущее значенее РХД, м³/мин	Что делать с РХД?	
	Оптимум 1 по производству	Оптимум 2 по расходу кокса		по производству	по расходу кокса
1	2	3	4	5	6
2			2934		
4	3017 6218	2871 245	2761	↑	↑
6	>2981 5895		2837	↑	
7	>2578 4333		2395	↑	
8	>2934 4688	>2934 271	2797	↑	↑
9	>3845 8101	3616 250	3770	↑	↓
10	4560 8724		4462	↑	

1.2. Контроль и оптимизация радиального газораспределения на колошнике

Для определения распределения газового потока по радиусу колошника печи, при котором достигается максимальное использование химической энергии необходимы [2, 4, 5, 34–37]:

- информация о распределении температуры газа по радиусу печи (рисунок 2);
- информация о составе общего колошникового газа;
- количественная оценка распределения и использования газового потока. Для оценки параметров распределения газового потока по радиусу печи используются коэффициенты радиальной неравномерности (КР, КРР и КРС) и степень использования СО;
- сопоставление полученных показателей использования газового потока с целью определения значения Кр. Значение Кр и распределение газового потока по радиусу печи, ему соответствующее, принято считать оптимальными.

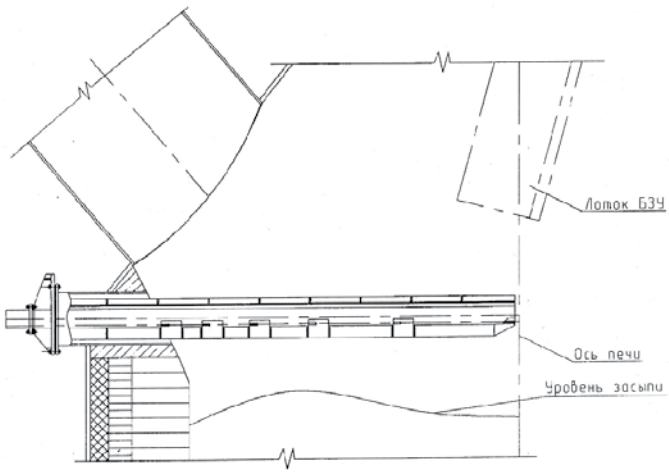


Рис. 2. Радиальный многоточечный термозонд для доменных печей с лотковым загрузочным устройством

Необходимо отметить, что косвенные способы контроля радиального распределения газа недостаточно обоснованы [7]. Непрерывный контроль радиального газораспределения особенно важен для контроля параметров зоны плавления в доменной печи.

Исследования показали, что для определения оптимального радиального распределения газа в доменной печи необходимо контролировать и анализировать форму распределения газа на колошнике печи и форму зоны плавления в заплечиках. Окончательный параметр контроля выбирать по результатам этого анализа.

1.3. Контроль и оптимизация окружного газораспределения на колошнике

Для доменной печи, оборудованной БЗУ лоткового типа, вопрос контроля и оптимизации окружного распределения шихты занимает важное место. Сложность использования БЗУ лоткового типа в достижении равномерного окружного распределения шихты объясняется невозможностью контроля «замыкания колец» шихты при попадании её на поверхность ранее загруженной шихты [34], сложным механизмом истечения материалов из бункера БЗУ при загрузке в него двух и более видов материалов, отличающихся по гранулометрическому составу и насыпному весу [35].

Для контроля окружного газораспределения на колошнике используются:

- периферийные термопары [25], устанавливаемые над уровнем засыпи. Спаи термопар должны быть расположены на одном расстоянии от вертикальной части защитных плит колошника и первых точек радиальной термобалки;
- термопары в газоотводах печи;
- термопары (6–8 точек) под защитными плитами колошника.

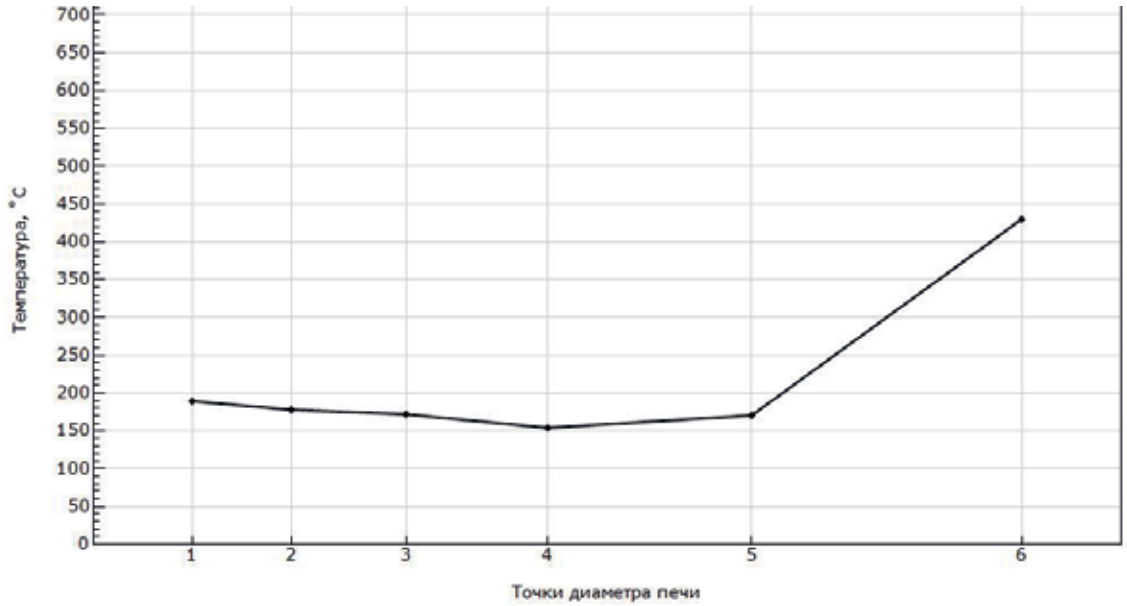


Рис. 3. Распределение температуры газа по радиусу ДП2 за сутки (27.06.2017 00:00 – 28.06.2017 00:00)

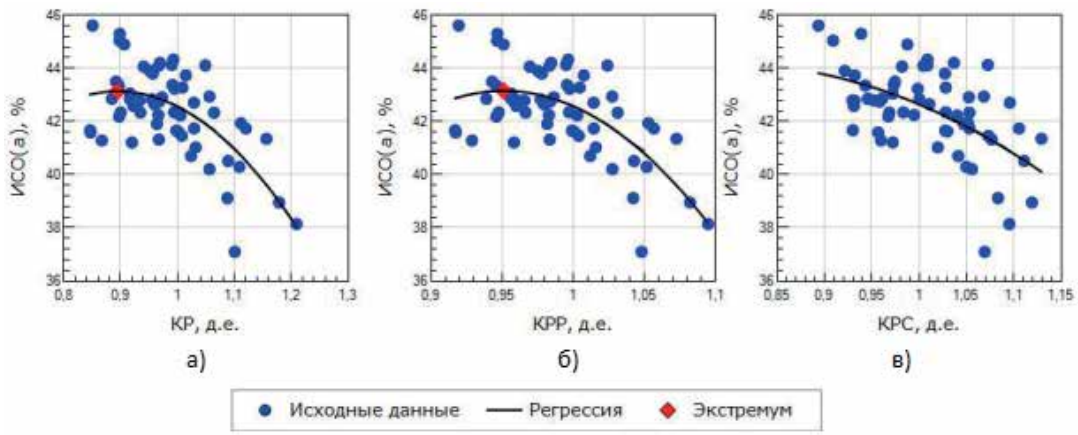


Рис. 4. Зависимость от КР, КРР, КРС ДП6 за сутки с 01.06.2017 по 31.07.2016

Влияние выгрузки шихты на изменение температуры газа, выходящего из периферийной части печи, изучается путем построения графиков с фиксацией величин падения температур после выгрузки шихты в разных точках периферии печи по показаниям периферийных термопар. Так, например, при выгрузке в 10 час. 11 мин. 28.03.2012 из-за сложного механизма истечения слоёв агломерата и окатышей из бункера БЗУ железорудная часть шихты распределилась неравномерно (рисунок 5). Тогда как при предыдущей выгрузке распределилась по периферии печи практически равномерно (рисунок 6).

Для достижения равномерного окружного распределения шихтовых материалов с помощью БЗУ необходимо регистрировать понижение температуры периферийных газов, вышедших после загрузки каждого вида шихтовых материалов, для каждого угла наклона лотка. Сравнивать между собой их абсолютные значения и, в случае разницы изменений показаний у менее половины подряд стоящих термопар по сравнению с остальными, изменять открытие шихтового затвора до достижения в обоих случаях одинаковой разницы показаний всех термопар после загрузки каждого вида шихтовых материалов.

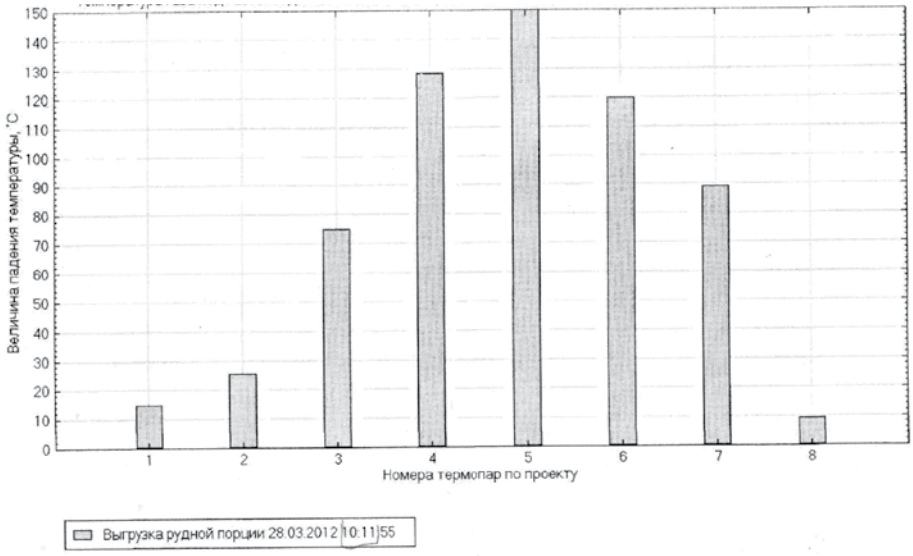


Рис. 5. Температура газа под газоотводами. Абсолютные значения изменения показаний ДП10 не в порядке реакции на выгрузку

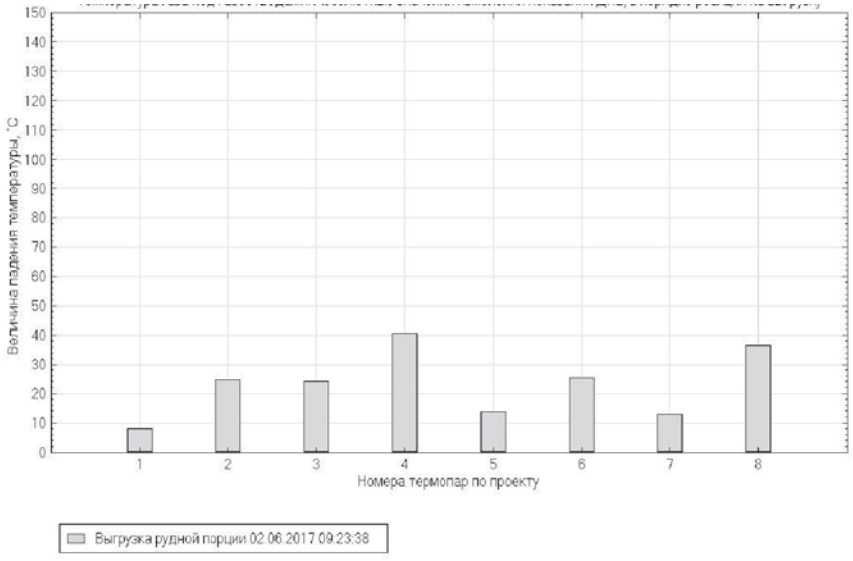


Рис. 6. Температура газа под газоотводами. Абсолютные значения изменения показаний ДП2 в порядке реакции на выгрузку

2. КОНТРОЛЬ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МАССООБМЕНА

Наименее изученным остается вопрос массообмена. Управление массообменом занимает важное место в доменной плавке и направлено на оптимизацию восстановительных процессов, протекающих по высоте печи. Этот процесс имеет критерий оптимизации. Критерием оптимизации является соотношение прямого и непрямого восстановления (rd).

К сожалению, не существует методики, решающей данное отношение. Известны только предположения, согласно которым эти отношения изменяются от 0,2 до 0,8 [36, 37]. М.А. Павлов [38] считал, что степень прямого восстановления практически не выходит за пределы 0,4–0,6. Авторы работы [39] считают, что на печах без применения природного газа степень прямого восстановления составляет 0,4–0,6, а на печах с природным газом — 0,2–0,4. Авторы работы [40] считают, что при изменении условий плавки оптимальное соотношение прямого и непрямого восстановления изменяется.

Первым шагом в определении соотношения прямого и косвенного восстановления является расчет материального и теплового балансов плавки. Цель проведения этих расчетов — использование величины их невязок и некоторых статей балансов для анализа протекания процессов массообмена и распознавания отклонений от нормы на более ранних стадиях.

Основными принципами расчета материального и теплового балансов являются:

- для составления материального и теплового балансов используются данные о шихтовых материалах (кокс, агломерат, добавки, окатыши), жидких продуктах плавки (чугун и шлак) и газообразных составляющих (дутье, природный газ, пар, колошниковый газ) доменного процесса;
- материальный и тепловой баланс составляют для шихтовых материалов, размещающихся в объеме печи; для газообразных составляющих, обрабатывающих данный объем материалов; для жидких продуктов плавки;
- расчет проводится автоматически ежечасно по принципу: новая информация добавляется, старая — забывается.

Система рассчитывает соотношения косвенного (r_i) и прямого (r_d) восстановления железа, при котором достигается минимальный расход кокса. Данное соотношение принято считать оптимальным. Полученное в результате расчетов местоположение точки пересечения линий зависимостей от r_d расхода кокса как восстановителя и как теплоносителя определяет минимально возможный расход кокса (рисунок 7).

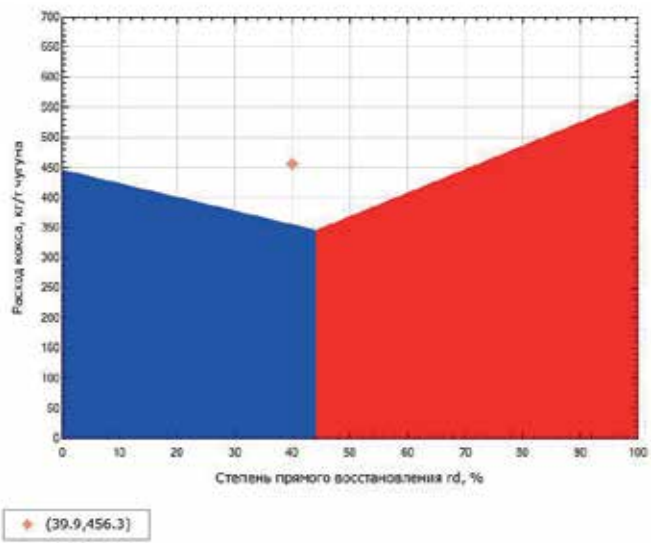


Рис. 7. Диаграмма прямого восстановления ДП2 за 20.03.2017 00:00 – 21.03.2017 00:00

Сложность практического использования зависимости удельного расхода от критерия процессов массообмена в доменной печи (r_d) заключается в том, что она имеет экстремальный характер (рисунок 7). Поэтому зависимость эта во многом определяется тем, с какой стороны от экстремума (минимального значения расхода кокса) находятся текущие значения r_d. В случае если r_d находятся слева от экстремума, то рост их будет приводить к снижению удельного расхода кокса, если справа — то к его росту.

Для возможности сравнения использовали два метода расчета R_d: метод Павлова и метод Рамма. Зависимости расхода кокса (рисунок 8б и 8ж) и производительности печи (рисунок 9б и 9ж) от r_d, определённого двумя разными методами оказались близкими. Это свидетельствует о справедливости данных расчетов и правильности обоих методов расчета r_d.

Тренды изменения R_d для пяти доменных печей ПАО «ММК» представлены на рисунке 10.

Полученные в результате расчетов данные возможно использовать следующим образом:

- если текущие значения R_d находятся в установленных пределах изменения R_d, то это свидетельствует, что соотношение косвенного и прямого восстановления находится в оптимальном диапазоне;

- в случае выхода значений R_d за установленные пределы возможны следующие два принципиально различных состояния:
  — R_d меньше нормы;
  — R_d больше нормы.

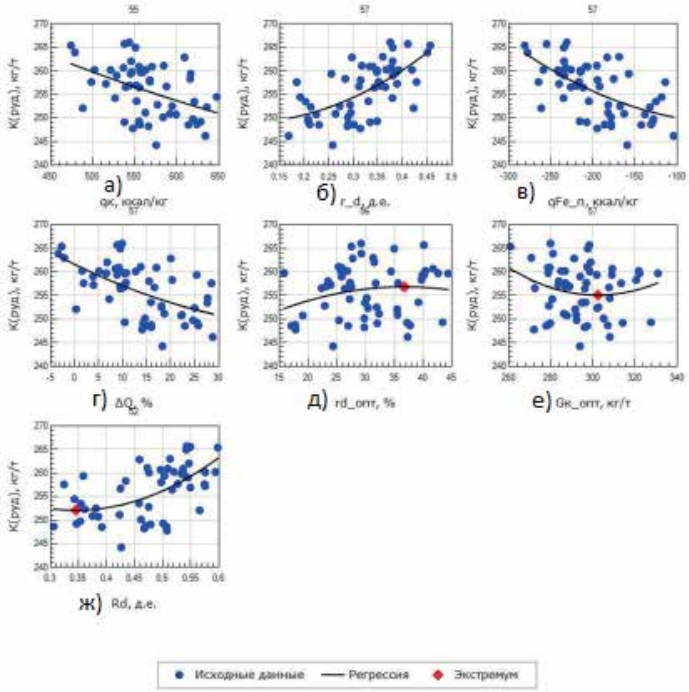


Рис. 8. Зависимость параметров работы ДП6 за сутки с 15.07.2017 по 15.09.2017

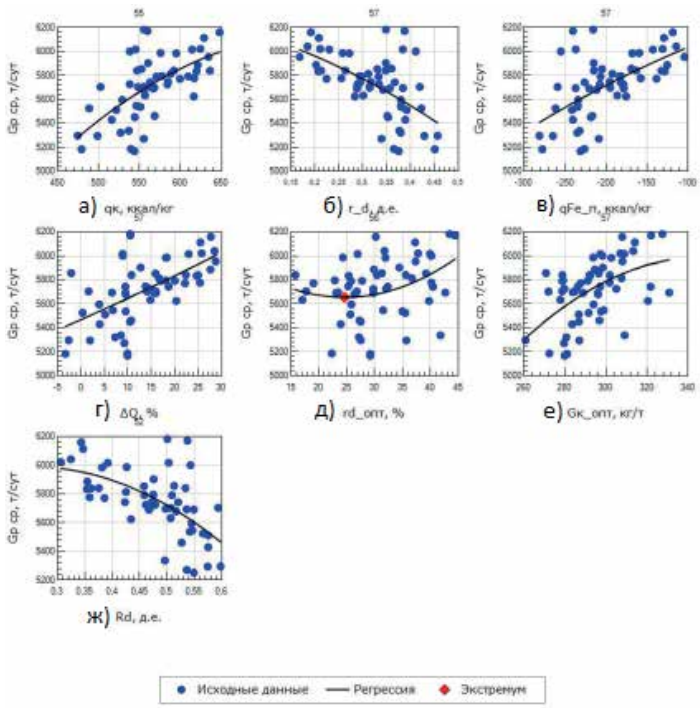


Рис. 9. Зависимость параметров работы ДП6 за сутки с 15.07.2017 по 15.09.2017

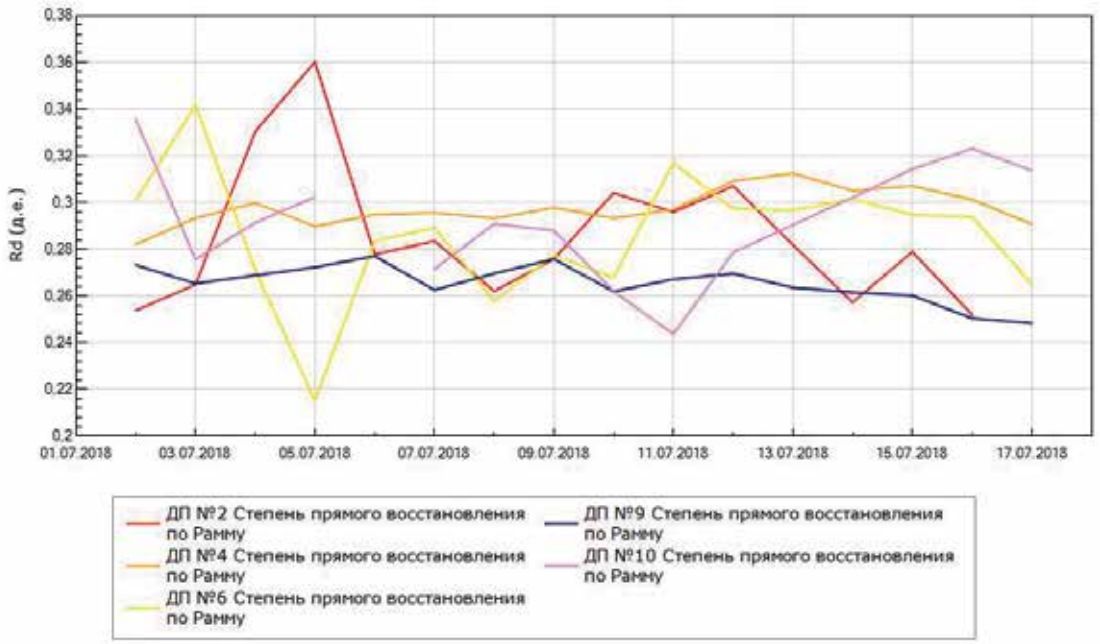


Рис. 10. Тренды параметров (сутки) с 02.07.2018 по 18.07.2018

В *первом случае* восстановителя в печи больше, чем нужно для данного состава и количества железорудных материалов. Меры воздействия в зависимости от нагрева «шахты» и «горна» — снижение расхода кокса или снижение расхода природного газа.

Во *втором случае* наблюдается плохая работа газового потока. Меры воздействия для повышения эффективности работы газового потока:

- изменение параметров загрузки в соответствии с рекомендациями системы;
- при недостатке восстановителя в печи — увеличение расхода кокса или природного газа в зависимости от нагрева «шахты» и «горна» печи.

3. КОНТРОЛЬ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА

На конечные показатели плавки (K и Gp) оказывают сильное влияние теплообменные процессы [1–10]. Система «Контроль нагрева материалов в шахте и горне печи», установленная на доменных печах ПАО «ММК», определяет с определенной частотой (раз за выпуск, смену, сутки, неделю) комплексные параметры, характеризующие процессы теплообмена (рисунок 11):

- температура материалов и продуктов плавки на выходе из второй зоны теплообмена: * (t_2") — на выходе из «шахты» (шахта, распар и заплечики) или (t_3") — на входе в фурменные очаги. Численно (t_2") = (t_3");
- температура материалов и продуктов плавки на выходе из третьей зоны теплообмена: * (t_3") — на выходе из фурменных очагов;
- температура продуктов плавки (чугуна и шлака) на выходе из четвёртой зоны теплообмена: *(t_4") — на выходе из зоны доводки.

Комплексные параметры теплообмена используются:

- для непрерывного автоматического контроля нагрева материалов и продуктов плавки в «шахте» (t_2"), фурменных очагах (t_3") и «горне» (t_4");
- для оптимизации нагрева «шахты» (t_2") и «горна» (t_4") за счет изменения расхода кокса при загрузке шихты и изменения в комбинированном дутье природного газа, ПУТ, мазута, влаги, кислорода;
- для прогноза нагрева «шахты» (t_2") и «Горна» (t_2" и t_4") печи.

3.1. Оптимизация теплового состояния

Сложность управления тепловым состоянием доменной печи определяется наличием двух критериев теплообменных и восстановительных процессов по высоте доменной печи. Наличие двух критериев теплообмена определяется тем, что доменная печь от уровня засыпи до чугунной летки разделена на четыре зоны тепло-массообмена (рисунок 11).

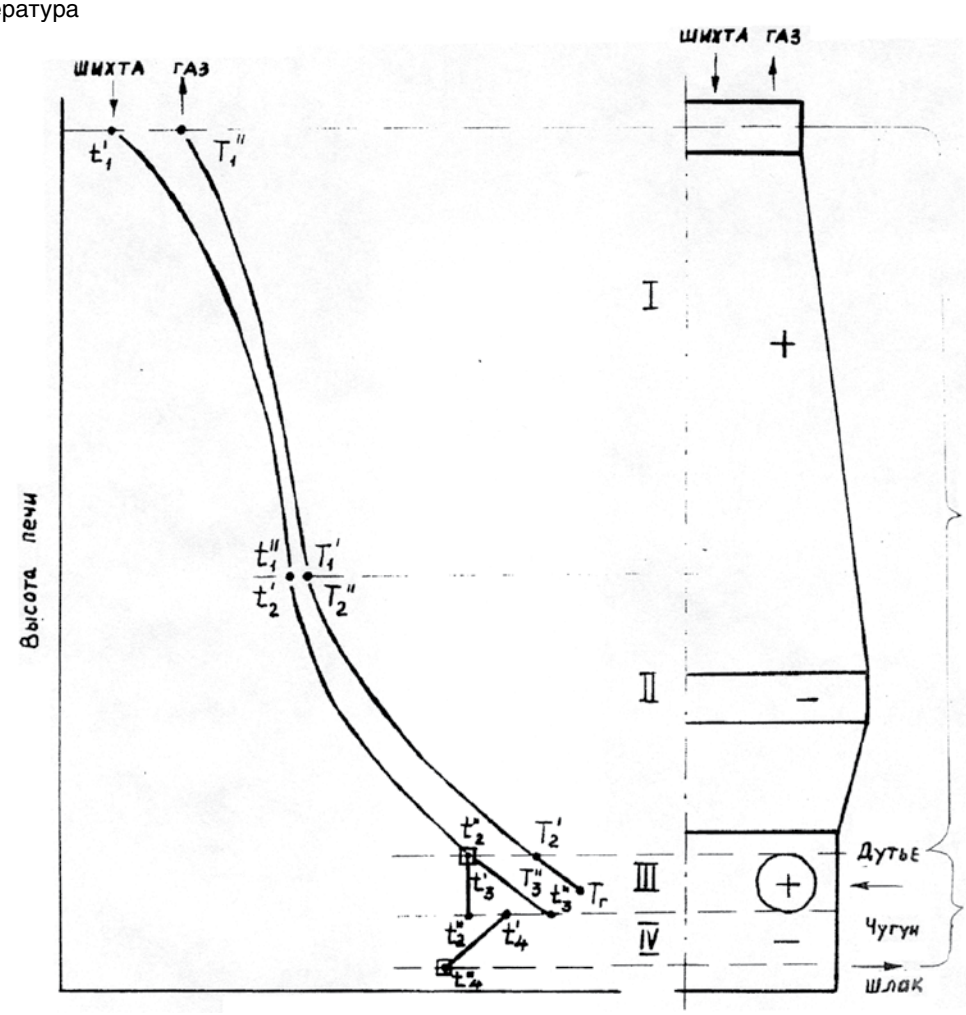


Рис. 11. Распределение зон теплообмена (I–IV) и температур материалов (t) и газа (T) по высоте печи (от уровня засыпи до чугунной летки)
□ — критерии теплового состояния доменной печи; I, II, III, IV — зоны теплообмена
+, (–) — процессы идут с выделением (поглощением) тепла

В этих зонах процессы идут с разными конечными тепловыми эффектами:

- первая — зона косвенного восстановления, в которой процессы идут с небольшим выделением тепла;
- вторая — зона смешанного восстановления, в которой идут процессы прямого восстановления с большим поглощением тепла;
- третья — зона фурменных очагов, в которой идут процессы горения кокса и окисления ранее восстановленного железа с большим выделением тепла;

- четвертая — зона окончательного формирования состава и нагрева продуктов плавки. Процессы идут с большим поглощением тепла за счет восстановления Fe (в т.ч. окисленного в фурменных очагах), Si, Mn, P и других примесей чугуна.

Тепловые процессы в первой и третьей зонах идут с выделением тепла, во второй и четвертой — с поглощением. Нельзя добиться заданного нагрева и состава чугуна, воздействуя только сверху, поскольку неконтролируемые изменения тепловых процессов во второй, третьей и четвёртой зонах с разными конечными тепловыми эффектами не дают желаемого результата. Зная нагрев продуктов плавки на выходе из второй и четвертой зон (в которых процессы идут с отрицательным тепловыми эффектами), можно эффективно управлять тепловым состоянием печи в целом. Поскольку конечный тепловой эффект во второй и четвертой зонах зависит также от тепловых и восстановительных процессов, протекающих, соответственно, в первой и третьей зонах, первая и вторая зоны объединены в «шахту», а третья и четвертая — в «Горн» печи.

Таким образом, критериями теплового состояния печи являются (рис. 11):

- температура материалов на выходе из «шахты» (шахта, распар, заплечики) печи ($t"_2$);
- температура продуктов плавки на выходе из «горна» печи ($t"_4$).

Установлено [30], что для определения и достижения оптимального теплового состояния печи необходимо проводить следующее:

- непрерывный контроль текущих значений $t"_2$ и $t"_4$;
- определение оптимальных значений $t"_2$ и $t"_4$
  - — оптимальное значение $t"_2$ находится отдельно для производства чугуна и расхода кокса (рисунок 12);
  - — оптимальное значение $t"_4$ выбирается из условий стабильной работы печи и дальнейшего передела 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 расхода кокса, природного газа, ПУТ, влаги, кислорода.

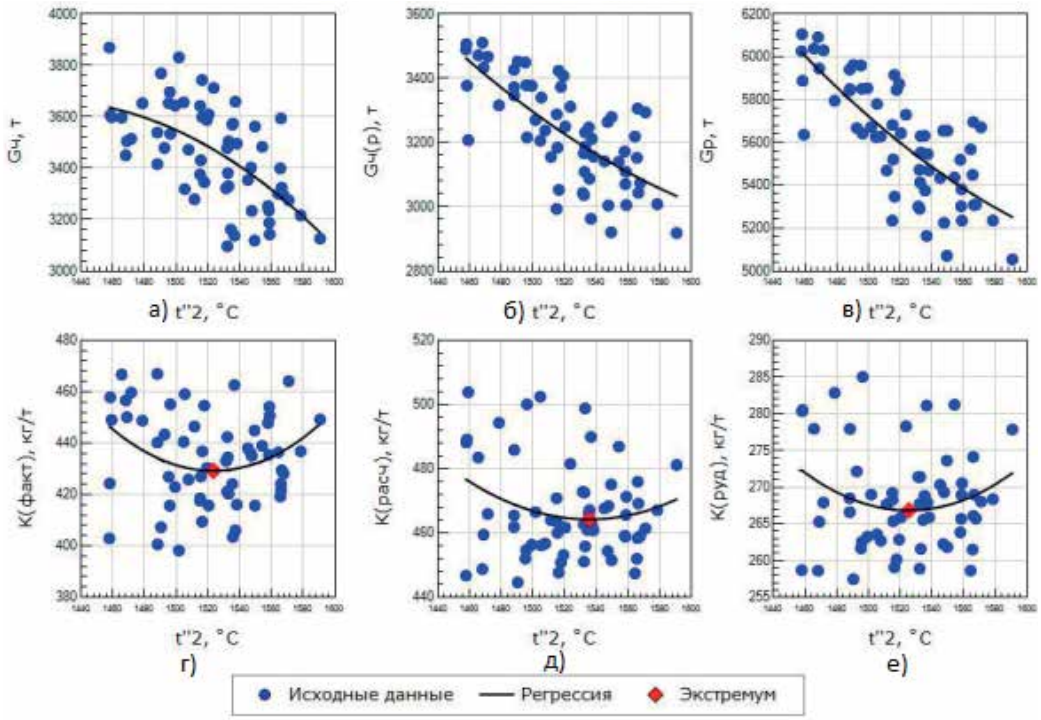


Рис. 12. Зависимость параметров работы ДП4 от температуры материалов на входе в фурменные очаги за сутки с 20.04.2017 по 28.06.2017

Варианты соотношений текущих и оптимальных значений температур материалов на выходе из «шахты» и чугуна на выходе из «горна» и приемы воздействия на текущие значения температур показаны в таблице 3.

Вариант I — нагрев шахты и горна превышает оптимальные значения. Основной мерой воздействия в этом случае должно быть снижение расхода кокса.

Вариант II — нагрев шахты и горна ниже оптимального значения. Основной мерой воздействия в этом случае должно быть увеличение расхода кокса.

Вариант III — нагрев шахты превышает оптимальное значение, нагрев горна ниже оптимального значения. Для уменьшения t''_2 необходимо увеличить температуру дутья ($t_д$) или содержание кислорода в дутье ($И$), или уменьшить относительный расход природного газа (Д), или расход ПУТ, или влажность дутья (φ).

Вариант IV — нагрев шахты ниже оптимального значения, нагрев горна превышает оптимальное значение. Аналогичные действия по управлению нагревом шахты и горна печи производят с противоположным (по отношению к варианту III) знаком.

Таблица 3. 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.

Результаты определения оптимальных значений t''_2 по производительности печи (ст. 2) и по удельному расходу кокса (ст. 3), среднее текущее значение комплексных показателей за сутки (ст. 4), местоположение относительно оптимальных значений по производительности печи и удельному расходу кокса (ст. 5) и о необходимых мерах для достижения обоих оптимумов (ст. 8) представлены в таблице 4 для доменных печей ПАО «ММК».

Таблица 4. Оптимальные значения нагрева «шахты» доменных печей по производству и по расходу кокса за сутки

ММК № ДП	Оптимальные значения t''_2		Текущие значения				Что делать?	
	Оптимум 1	Оптимум 2	t''_2, °С		t''_3, °С	t''_4, °С	По t''_2	По t''_3
	по производству	по расходу кокса						
	t''_2, °С	t''_2, °С	Значение	Местоположение				
	Gp, т	К(руд), кг/т						
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
2	**1435** 5059	**1520** 264	1605	больше оптимума 2	2027	1560	↓ПГ ↑ω	N
4	<1463 5958		1565		1971	1542		N

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	**1504** 5975	**1627** 253	1544	между 1 и 2	2004	1532	N	N
7	<1537 4165	**1660** 264	1632	между 1 и 2	2030	1549	N	N
8	**1526** 4648	**1568** 270	1490	меньше оптимума 1	2046	1530	↑ПГ ↓ω	N
9	**1520** 7798	**1569** 250	1551	между 1 и 2	1999	1532	N	N
10	<1402 8995	**1515** 254	1513	между 1 и 2	2003	1536	N	N

3.2. Непрерывный автоматический контроль параметров теплообмена

Большое значение для управления тепловым состоянием печи имеют тренды его параметров. Данная методика внедрена на доменных печах ПАО «ММК» (рисунок 13). Определение оптимальных значений t_2" и фиксация их изменений во времени позволят оперативно и непрерывно контролировать значение t_2". Это позволяет избежать отклонения от оптимального уровня по данному показателю.

Температура t_2" характеризует:

- нагрев материалов и продуктов плавки, располагающихся в большом объеме печи от уровня засыпи до фурменных очагов. t_2" определяется с помощью математической модели [3–10];
- местоположение зоны плавления по высоте доменной печи;
- нагрев материалов и продуктов плавки, примыкающих к кладке печи в районе заплечиков (таблица 3).

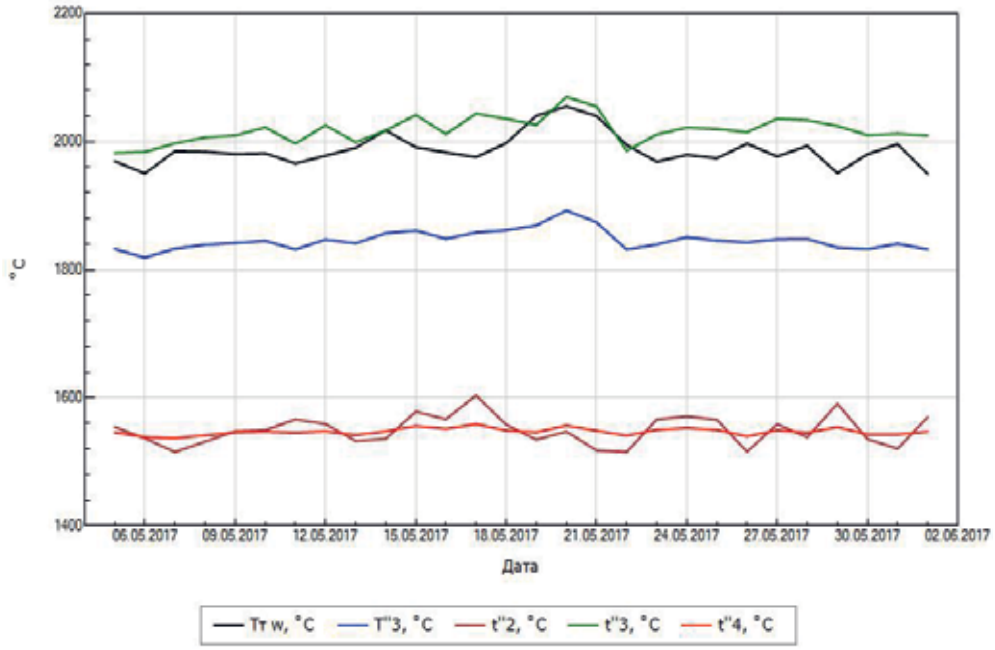


Рис. 13. Тренды параметров нагрева горна ДП4 (сутки) с 05.05.2017 по 02.06.2017

Для удобства использования результатов расчетов тренды изменения t_2" для всех печей цеха представлены на одном графике (рисунок 14).

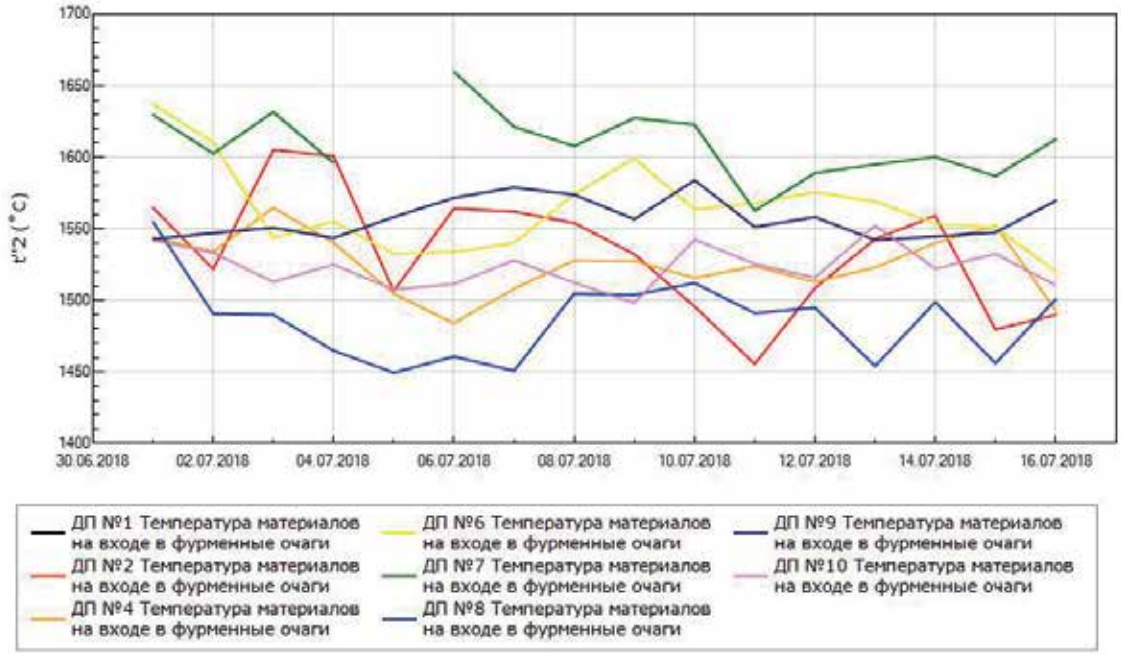


Рис. 14. Тренды параметров (сутки) с 01.07.2018 по 17.07.2018

Фиксация изменения комплексных показателей нагрева печи во времени позволяет непрерывно контролировать изменение температуры продуктов плавки на выходе из фурменных очагов ($t"_3$) (рисунок 15). Установлено, что превышение температуры продуктов плавки выше 2100°С на выходе из фурменных очагов приводит к горению фурм [6]. Контроль над этим показателем также является одной их задач управления тепловым состоянием печи.

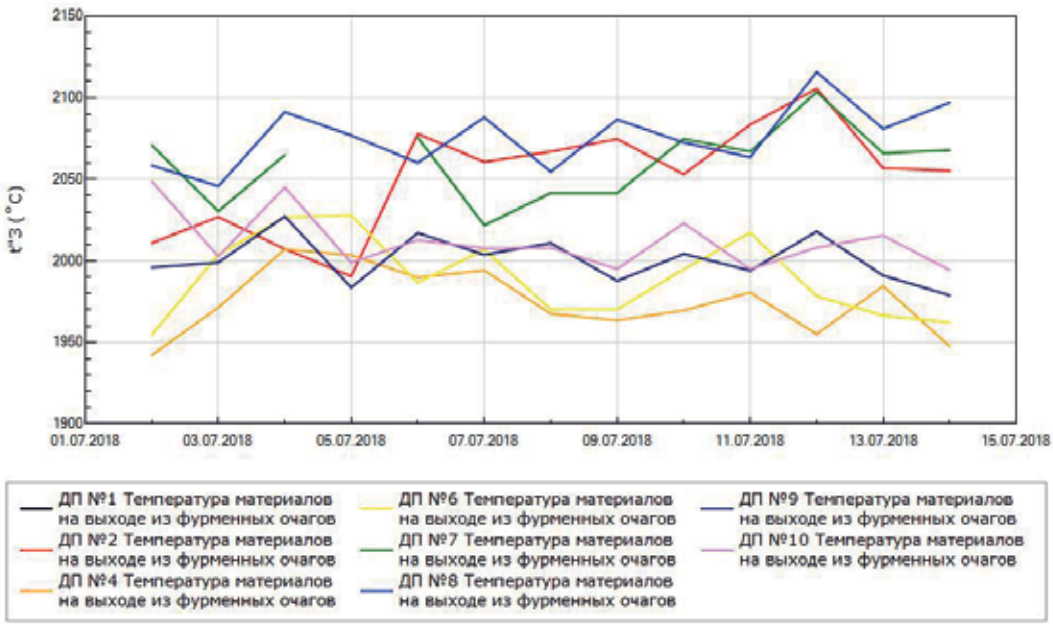


Рис. 15. Тренды параметров (сутки) с 02.07.2018 по 15.07.2018

В таблице 4 (ст. 6, 9) представлены средние текущие значения t''_3 за сутки работы доменных печей (ст. 6). Отображено их сравнение с критическим значением (2100 °С) (*если числа меньше этой величины, то покрашены в зелёный цвет, если больше, то — в красный*), меры сравнения этих величин (ст. 9).

3.3. Использование комплексного показателя теплообмена для прогноза нагрева «шахты» и «горна»

Эффективность управления нагревом печи значительно возрастёт, если мы будем знать не только их текущие значения, но и какие возможные изменения теплового состояния в шахте (t''_2) и горне (t''_4) печи возможны. Следовательно, для эффективности принимаемых мер по изменению нагрева шахты и горна печи необходимо осуществлять их прогноз. Системы, предназначенные для прогнозирования нагрева шахты и нагрева горна должны занимать особое место в контроле и управлении доменной печью.

3.3.1. Прогноз нагрева горна печи

Система предназначена для прогнозирования содержания кремния в чугуне предстоящего выпуска с использованием самонастраивающейся статистической модели [41, 42]. На ДП-2 ПАО «ММК» используется метод, основанный на данных о температуре рыльной части воздушной фурмы каждого фурменного очага с помощью датчиков теплосъёма (рисунок 16) и содержанием кремния в чугуне последнего выпуска. На выходном видеокадре системы представлены фактическая и прогнозная кривые изменения содержания кремния в чугуне предстоящего выпуска. Полученное для ДП-2 ММК сопоставление этих кривых представлено на рисунке 17. Упреждающее (как минимум за 2 часа до открытия чугунной летки) получение информации о предстоящем изменении в нагреве горна позволяет принять своевременные меры по приведению нагрева чугуна к заданному показателю. Это позволяет повысить эффективность плавки и стабилизировать состав чугуна на выпуске.

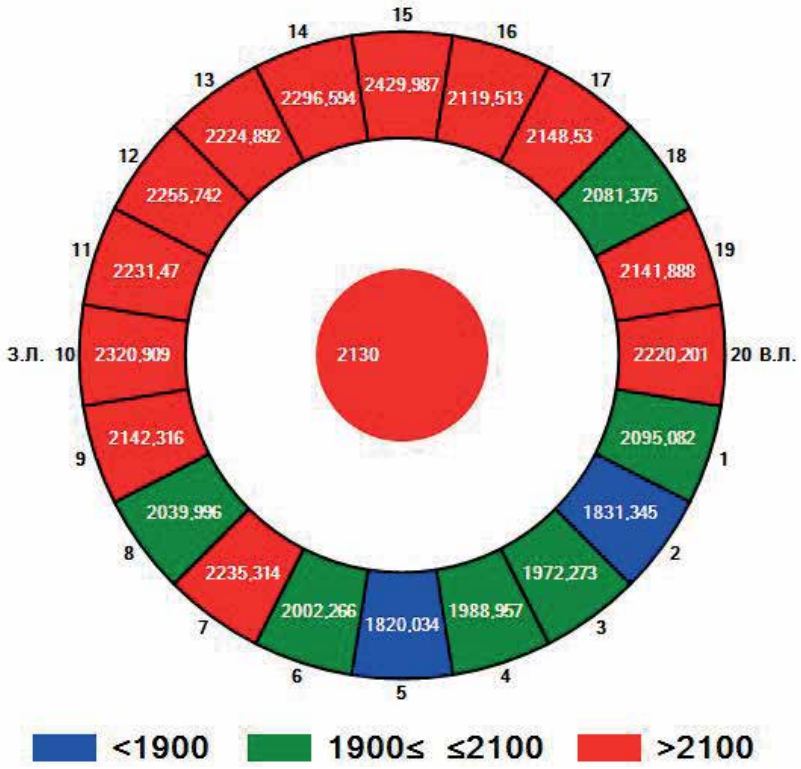


Рис. 16

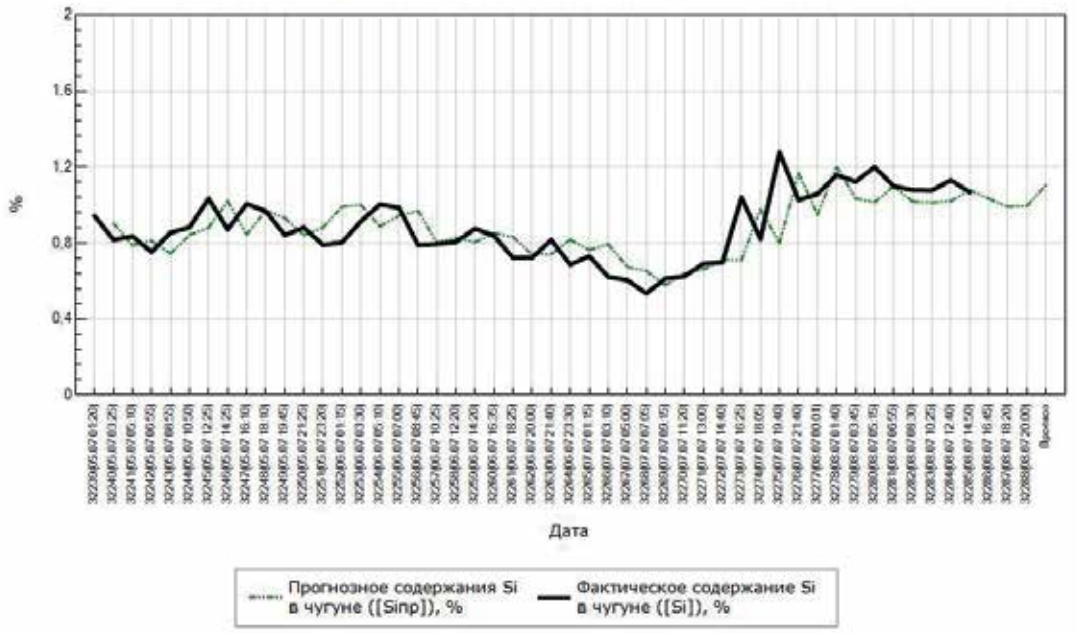


Рис. 17. Изменение содержания кремния в чугуне ДП2 с 05.07.2016 по 08.07.2016

Повышению эффективности плавки и стабилизации состава чугуна на выпуске способствует выравнивание температуры фурменных очагов $T_{фо}$ за счет регулирования расхода природного газа по фурмам (таблица 5).

Внедрение системы эффективно на доменных печах, применяющих природный газ и пылеугольное топливо без возможности регулирования их расхода по фурмам. В этом случае регулирование расхода природного газа по фурмам для достижения равенства температур создает одинаковые условия для горения пылеугольного топлива в фурменных очагах, что повышает эффективность его использования.

Таблица 5

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
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
Задание на ПГ																					

3.3.2. Прогноз нагрева «шахты» печи

Для снижения энергоемкости выплавки чугуна необходимо в оперативном режиме контролировать, прогнозировать и поддерживать оптимальное тепловое состояние шахты, распара и заплечиков доменной печи. С этой целью решаются следующие задачи:

- нахождение эффективных значений показателей теплового состояния печи при текущих значениях неуправляемых на оперативном уровне факторов таких, как структура, химический состав железорудного сырья, топлива и др.;
- прогнозирование нагрева шахты доменной печи.

Для решения указанных задач разработана система прогнозирования параметров теплового состояния доменного процесса, включающая в себя следующие две подсистемы.

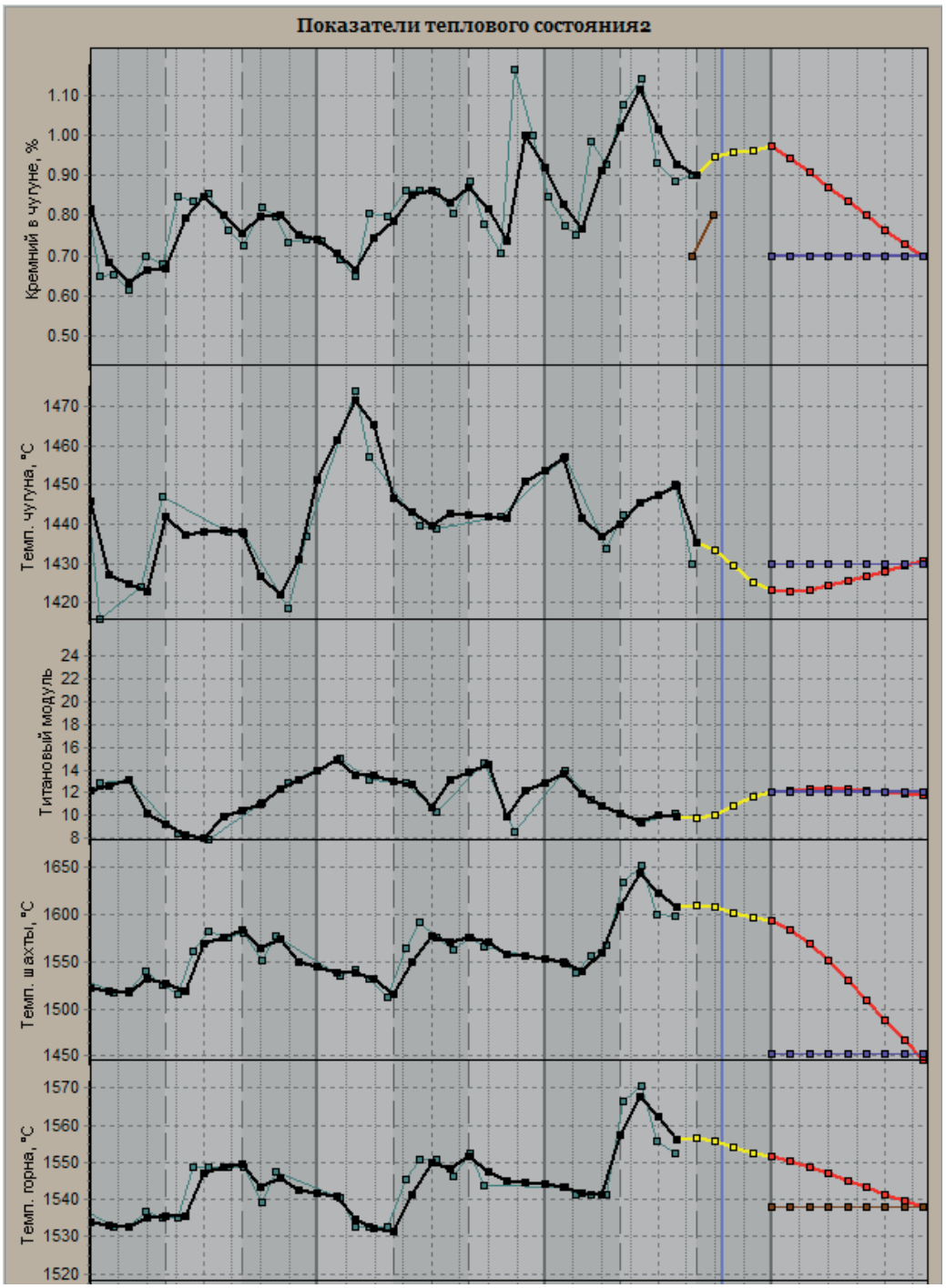


Рис. 18. Прогнозирование показателей теплового состояния шахты и горна печи

Подсистема 1.

В подсистеме применяются специальные методы кластерного анализа, позволяющие при различных значениях большого количества факторов (более 60) определять области режимных параметров печи эффективные по критериям повышения производительности и снижения удельного расхода кокса [43–45]. При этом для преодоления сложности анализа и оценки взаимосвязей большого количества режимных параметров печи в данной работе предлагается использовать двумерные тепловые карты режимов работы доменной печи, построенные в результате кластерного анализа данных эксплуатации. Совместное рассмотрение приведенных двумерных карт образует единый атлас доменного процесса, отображающий взаимное изменение технологических параметров с учетом связей между ними. Анализ атласа позволяет определять эффективные режимы работы печи, требуемые прогнозные значения управляющих факторов (расход кокса в подачу, расход природного газа, кислорода, пара на увлажнение, температура и расход дутья) для достижения данных режимов, определяемые с учетом существующих ограничений по неуправляемым факторам.

Подсистема 2.

Выполняет функцию прогноза обобщенной температуры шахты печи t_2" с учетом динамики ее изменения. Система прогноза работает в темпе доменного процесса с дискретностью расчета один выпуск. Начальной точкой прогноза является последнее известное значение t_2", рассчитанное по фактически измеренным параметрам процесса. Конечная точка прогноза определяется на основе использования кластерного анализа в подсистеме 1. При этом особенность используемого подхода состоит в том, что доменная печь рассматривается как динамическая система, параметры которой изменяются во времени с различной скоростью и задержкой. С учетом этого в подсистеме 2 периодически оценивается скорость и степень влияния управляющих факторов. Это позволяет более точно выполнять прогноз и управление тепловым состоянием шахты печи.

В качестве примера на рисунке 18 приведен фрагмент программного модуля прогноза теплового состояния печи, включающий прогнозирование температуры t_2" (рисунок 18г). Кроме того, в зависимости от требований, предъявляемых к системе, существует возможность прогнозирования и других факторов, включая содержание кремния в чугуне, температуру чугуна и др. На рисунке 18 зеленым цветом обозначены исходные (измеренные либо расчетные) статистические данные; черным — отфильтрованные статистические данные; желтым — прогноз изменения параметра, исходя из фактических значений управляющих факторов, которые были до текущего момента времени (вертикальная фиолетовая линия); красным — прогноз изменения параметра с учетом изменения управляющих факторов; фиолетовым (горизонтальные линии) — конечная точка прогноза, определяемая на основе использования кластерного анализа в подсистеме 1.

Необходимо отметить, что в состав прогнозируемых показателей теплового состояния входит также нагрев горна (рисунок 18д), получаемый с использованием рассматриваемого в данном разделе метода. Прогноз нагрева горна с использованием двух разных методов повышает его достоверность и надёжность.

Представленные результаты могут быть использованы для нахождения требуемых значений управляющих факторов, которые позволят при текущих значениях неуправляемых факторов оперативно поддерживать оптимальное тепловое состояние шахты и горна печи.

4. КОНТРОЛЬ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ПЛАВЛЕНИЯ

Из всех возможных методов автоматического контроля параметров зоны плавления практически применимым является расчетный метод с использованием двумерной математической модели. Разработанная двумерная математическая модель [13–18, 23–28] отвечает поставленным требованиям и является основным инструментом системы для контроля и оптимизации параметров зоны плавления (система «Когезия») в реальном масштабе времени. Система «Когезия» реализована в составе АСУТП пяти доменных печей ПАО «ММК».

Система «Когезия» решает следующие технологические задачи:

- непрерывный автоматический контроль параметров зоны плавления;
- количественная оценка зоны плавления;
- выявление влияния параметров зоны плавления на показатели доменной плавки;
- количественная оценка зоны плавления на показатели плавки;
- установление входных и выходных параметров плавки, влияющих на параметры зоны плавления и их количественная оценка;
- определение оптимальных значений параметров зоны плавления.

Параметры зоны плавления:

- оценка формы зоны плавления:
  - — L (ФО — п) — расстояние от линии верха фурменных очагов до линии конца плавления у стенки печи, м;
  - — L(ФО — ц) — расстояние от линии верха фурменных очагов до линии конца плавления в центре печи, м;
- оценка местоположения зоны плавления:
  - — L(ФО — к) — расстояние от линии верха фурменных очагов до корня, м;
  - — $L_{ср2}$ — расстояние от линии верха фурменного очага до линии конца 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;
- оценка толщины зоны плавления:
  - — Нср — толщина зоны плавления как среднеарифметическое трех измерений: расстояния от линии начала до линии конца плавления на периферии, в корне и на оси печи, м.

Зависимость производительности ДП-2 ПАО «ММК» (выражена через проплав железорудных материалов — Gpcp, т/сутки) от параметров, характеризующих форму, местоположение и толщину зоны плавления представлена на рисунке 19. Аналогичные зависимости получены для других доменных печей ПАО «ММК».

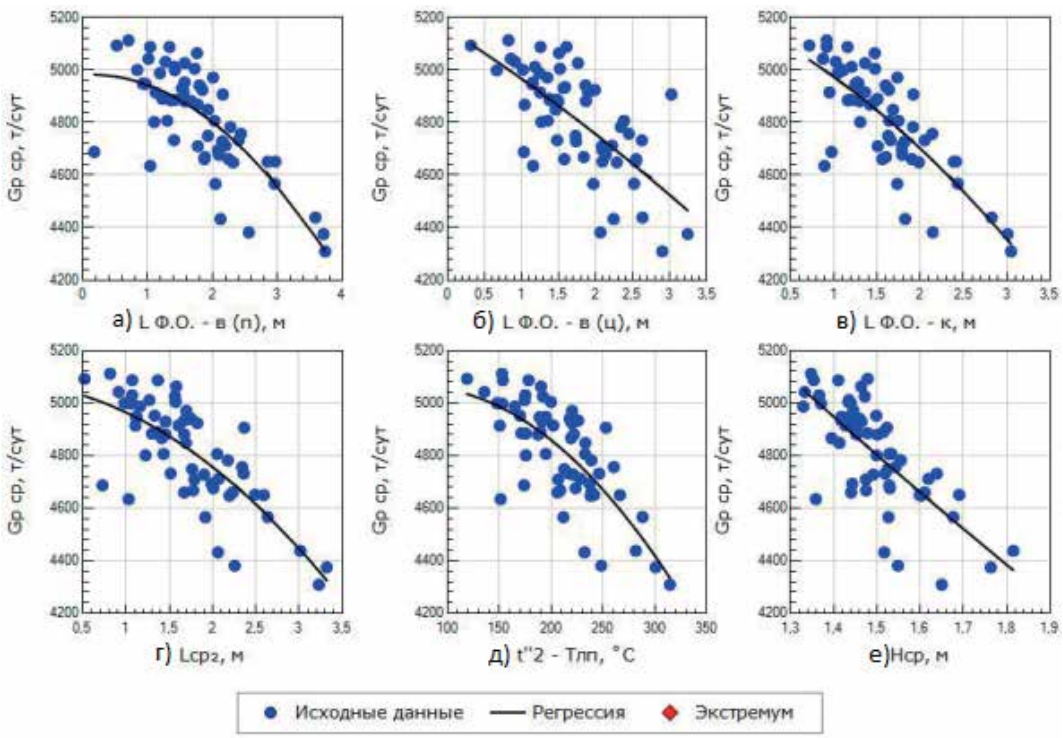


Рис. 19. Зависимость параметров работы ДП2 за сутки с 20.04.2017 по 28.06.2017

Одной из причин изменения производительности печи может быть подъём зоны плавления вверх по высоте печи, увеличение расстояния от верха фурменных очагов до линии плавления на периферии (рисунок 19а), в корне (рисунок 19в) и на оси печи (рисунок 19б). Это изменяет количество железорудных материалов в доменной печи, ведет к изменению её производительности. Снижение железорудного материала при сохранении количества и нагрева газов в печи ведет к увеличению её нагрева, выражающемуся в увеличении содержания кремния в чугуне на выпуске. Это видно из рисунка 20: раскрытие периферии (рисунок 20а) и центра (рисунок 20в) печи; подъём корня ЗП (рисунок 20в) и линии плавления (рисунок 20г); увеличение разности температуры материалов на входе в фурменные очаги (t_2") и температуры плавления ЖРМ (рисунок 20д); увеличение толщины зоны плавления (рисунок 20е) ведут к существенному росту содержания кремния в чугуне.

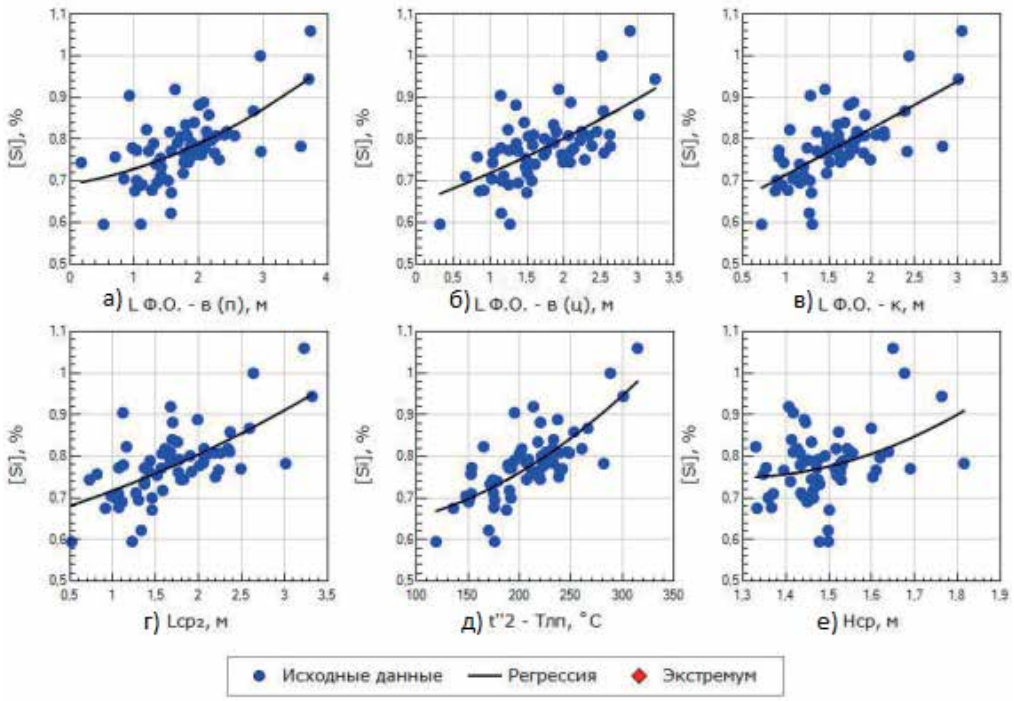


Рис. 20. Зависимость параметров работы ДП2 за сутки с 20.04.2017 по 28.06.2017

Полученные данные показали, что двухмерная математическая модель позволяет количественно оценивать параметры зоны плавления, проводить их сопоставление с конечными показателями плавки и находить параметры зоны плавления, при которых достигаются наилучшие показатели плавки. Ответить на вопрос выбора параметров зоны плавления, обеспечивающих наилучшие показатели плавки.

Полученные зависимости соответствуют общепринятым представлениям о влиянии параметров зоны плавления на конечные показатели плавки, за исключением одного. Показано, что не целесообразно открывать центр печи: изменение формы зоны плавления за счет подъёма её вершины на оси печи приводит к снижению производительности печи. Целесообразность открытия центра печи за счет подъёма её вершины на оси печи, наверное, было справедливо для доменных печей с конусными засыпными аппаратами и для шихты с крупными кусками. Большое количество кокса и агломерата одновременно загружались в печь, образуя слои кокса и агломерата, которые, возможно, сохранялись до зоны плавления.

При использовании БЗУ и более мелкой шихте, когда кокс и агломерат (окатыши), имеющие в три раза отличающиеся насыпные плотности, загружают раздельно, имеет место выклинивание агломерата (окатышей) при попадании их на загруженный слой кокса (при загрузке печи). 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 [25]). В этом случае железорудные материалы высыпаются на практически взвешенный слой кокса. При Ny = 0,5–0,6 начинается дополнительное разрыхление шихты и особенно коксового слоя. Поэтому выклинивание агломерата и особенно окатышей неизбежно.

4.1. Непрерывный автоматический контроль параметров зоны плавления

Важное место в управлении доменной плавкой занимает контроль изменения параметров зоны плавления во времени. Возможность количественной оценки изменения параметров зоны плавления позволяет контролировать их в различные периоды работы печи. Непостоянство параметров зоны плавления приводит к существенному снижению показателей эффективности работы печи. В качестве примера снижения показателей плавки из-за непостоянства параметров зоны плавления можно привести данные о работе печи при существенном увеличении содержания окатышей в шихте без изменения приёмов управления режима работы БЗУ.

То, как влияет неконтролируемое изменение распределения окатышей по сечению печи на ее работу и особенно на зону плавления при увеличении окатышей в шихте, можно видеть из рисунков 21–25. Из рисунка 21 (чёрная линия) видно, как изменяется расход окатышей за три периода работы печи. Хотя параметры работы БЗУ оставались прежними, распределение окатышей по сечению печи изменилось. Это привело к существенному изменению формы и местоположения зоны плавления (рисунок 22). Из этого рисунка видно, что произошло раскрытие периферии (коричневая линия) и центра печи (синяя линия); подъём всей зоны плавления вверх по высоте печи (зелёная линия). Это хорошо также видно из рисунков 23–25, на которых представлены характерные формы зоны плавления в первый, второй и третий периоды работы печи.

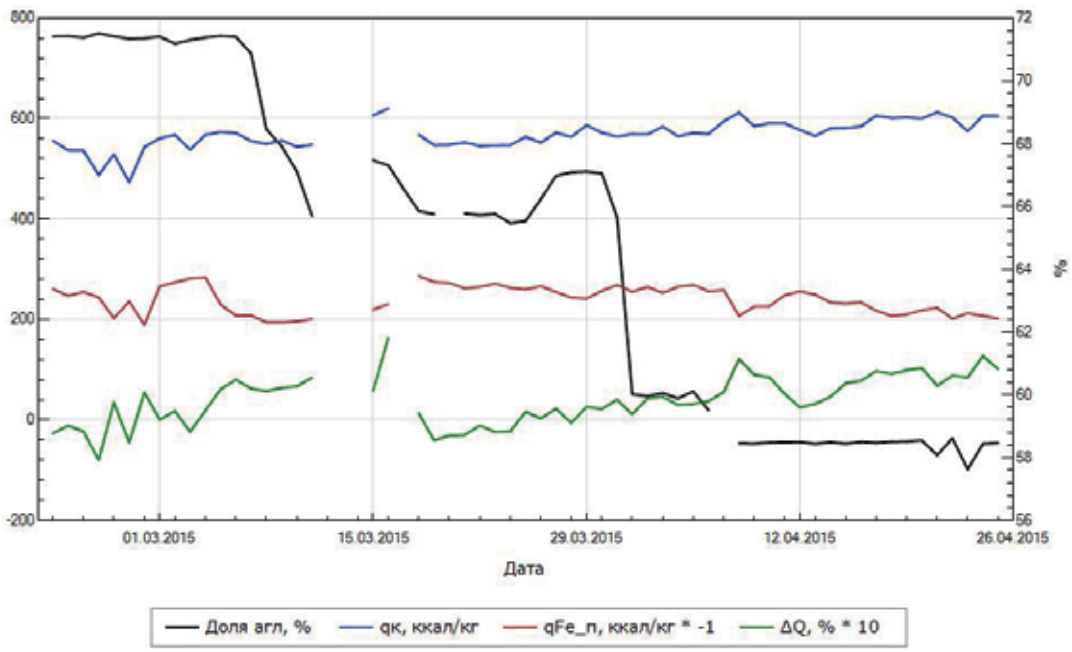


Рис. 21. Тренды параметров МТБ ДП2 (сутки) с 22.02.2015 по 26.04.2015

Полученные данные показали, что разработанная двухмерная математическая модель позволяет количественно оценивать параметры зоны плавления, проводить их сопоставление с конечными показателями плавки и находить параметры зоны плавления, при которых достигаются наилучшие показатели плавки.

Важное место в ведении доменной плавки занимает очередность операций для достижения наилучших показателей. Она обоснована по степени влияния мер воздействия на конечные показатели плав-

ки и должна проводиться в следующей последовательности: оптимизация газодинамического режима плавки; оптимизация радиальной неравномерности на колошнике; оптимизация окружной неравномерности на колошнике и в горне печи; оптимизация теплового состояния печи; оптимизация параметров зоны плавления.

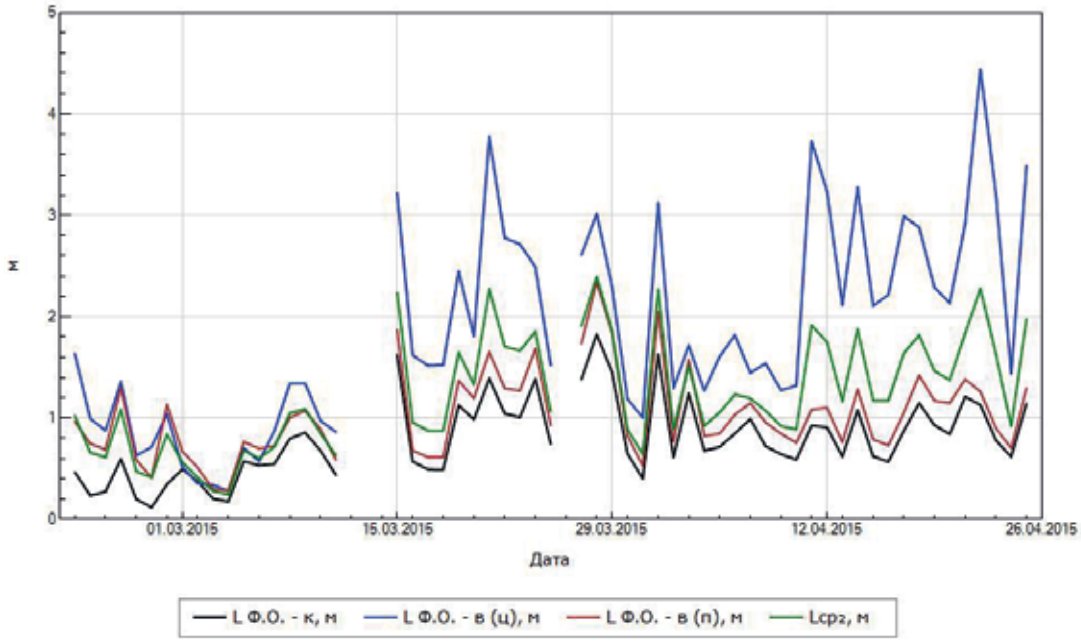


Рис. 22. Тренды параметров расчета параметров зоны плавления ДП2 (сутки) с 22.02.2015 по 26.04.2015

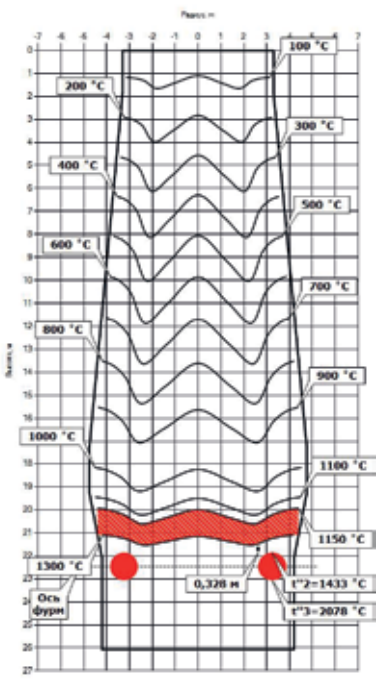


Рис. 23. Поля материалов изотерм ДП2 за сутки (05.03.2015 00:00 - 06.03.2015 00:00)

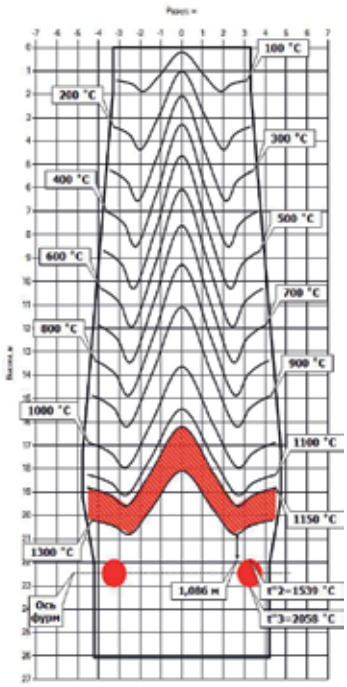


Рис. 24. Поля материалов изотерм ДП2 за сутки (21.03.2015 00:00 - 22.03.2015 00:00)

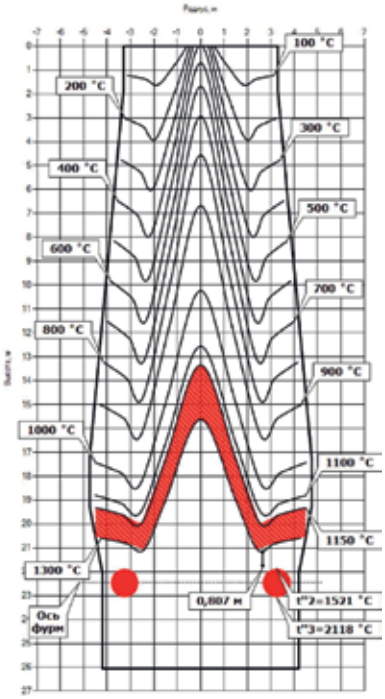


Рис. 25. Поля материалов изотерм ДП2 за сутки (11.04.2015 00:00 - 12.04.2015 00:00)

4.2. Непрерывный автоматический контроль температуры материалов и продуктов плавки, примыкающих к стенке печи в нижней части шахты, в распаре и в заплечиках печи

Непрерывный автоматический контроль параметров зоны плавления позволяет решить ещё одну важную задачу доменной плавки — непрерывный автоматический контроль температуры материалов и продуктов плавки, примыкающих к стенке печи в нижней части шахты, распаре и заплечиках печи.

Этим задачам должны соответствовать все мероприятия, направленные на управление доменной плавкой, в т.ч. и управление работой БЗУ. За температуру материалов, примыкающих к кладке нижней части шахты, распара и заплечиков можно принять температуру материалов первого кольца распределения температуры материалов по высоте пяти колец (рисунок 26), определяемую в системе «Когезия». Абсолютные значения температуры по высоте первого кольца напрямую зависят от работы БЗУ.

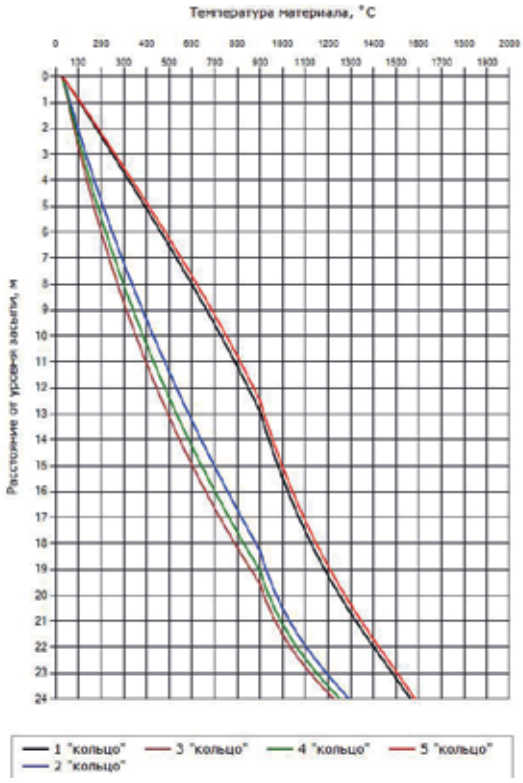


Рис. 26. Изменение температур материалов по высоте ДП10 за выпуск (между окончаниями) (21.06.2017 02:00 (1437) 21.06.2017 03:50)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Работа по созданию с помощью математических моделей автоматизированной системы контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки на доменных печах ПАО «ММК» позволила максимально полно и во взаимосвязи оценить газодинамические, массообменные, теплообменные и плавильные процессы, протекающие по высоте и сечению печи.
2. Использование математических моделей позволило решать следующие технологические задачи:
   - непрерывный автоматический контроль параметров плавки;
   - количественная оценка, выявление влияния на конечные показатели плавки и количественная оценка этого влияния;

- выбор комплексных параметров по каждому направлению (газодинамика, массообмен, теплообмен и плавление), оказывающих наибольшее влияние на конечные показатели плавки и их использование для оптимизации доменной плавки и непрерывного контроля состояния доменной плавки;
- выбор входных параметров плавки направления, величины и порядка их изменения;
- прогноз изменения наиболее ответственных параметров плавки и формирование рекомендаций для предотвращения расстройств печи;
- представление информации о работе одной и всех доменных печей цеха в удобном для восприятии и обобщенном графическом и табличном виде.

3. Полученные данные о влиянии на работу доменной печи газодинамического режима плавки, радиального и окружного газораспределения, массо- и теплообмена и параметров зоны плавления позволяют по-новому рассмотреть вопрос управления доменной плавкой, в т.ч. формирования рекомендаций по выбору режима работы БЗУ для повышения эффективности работы доменной печи и увеличения длительности её кампании.
4. Управление работой доменной печи и БЗУ должно проводиться с обратной связью, реагируя на изменения комплексных параметров, характеризующих газодинамические, массообменные, теплообменные и плавильные процессы плавки.

Список литературы

1. В.М. Паршаков, Ф.Р. Шкляр. Исследование влияния теплообмена в шахте печи на удельный расход кокса при увеличении интенсивности плавки сверх оптимальной. «Проблемы автоматизированного управления доменным производством». Киев, 1977, с. 9–10.
2. 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.
3. В.М. Паршаков, Б.А. Боковиков, Ф.Р. Шкляр. Математическая модель процессов тепло- и массообмена в фурменных очагах доменной печи. «Проблемы автоматизированного управления доменным производством». Киев, 1977, с. 18.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. В.М. Паршаков, Б.А. Боковиков, Ф.Р. Шкляр, В.П. Андреев. Методика расчета и определение экономически выгодных уровней параметров высокотемпературного комбинированного дутья. «Сталь», 1980, № 3, с. 169–173.
8. 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.
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. Паршаков, Ю.В. Яковлев, Г.П. Лежнев и др. Способ теплового регулирования доменной печи. Авторское свидетельство СССР на изобретение № 1246603, 1986 г.
11. Внедрение системы непрерывного контроля радиального газораспределения в доменной печи: Заключительный отчет / ВНИИ металлургической теплотехники; Руководитель В.М. Паршаков. —

УДК 669. 162.233.43; — № Гос. Регистрации 01823010894 — Инв. № 6725 — Свердловск — 1983. 77 с.
12. 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.
13. 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.
14. В.А. Заболотский, В.М. Паршаков, Г.К. Кабаков. Определение формы и местоположения зоны плавления в доменной печи с помощью двумерной математической модели. «Газодинамика и механика движения материалов в шахтных печах». Труды конференции. Свердловск, 1986 г., с. 20–21.
15. Т.Ю. Каширская, В.М. Паршаков, Ф.Р. Шкляр, В.А. Заболотский. Определение формы и местоположения зоны плавления в доменной печи с помощью двумерной математической модели. «Газодинамика и механика движения материалов в шахтных печах». Труды конференции. Свердловск, 1986г., с. 20–21.
16. 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.
17. В.М. Паршаков, Ю.М. Кузнецов, М.Г. Ладыгичев, Е.В. Петров. Замена топлива металлургических печей и агрегатов угольной пылью. Труды международного конгресса. «Пече- трубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология». «Теплотехник», М., 2004 г., с. 197–227.
18. В.М. Паршаков. Повышение эффективности использования пылеугольного топлива в доменной печи. «Сталь», 2005, № 8, с. 32–37.
19. 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.
20. 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.
21. Б. Федотов, В.М. Паршаков, Ю.В. Яковлев и др. Зонд для контроля процессов в фурменных зонах шахтных печей. Авторское свидетельство СССР на изобретение № 996446. Приоритет от 09.04.81.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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. 1069–1070.
26. 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.
27. 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.
28. 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.

29. В.М. Паршаков. Автоматизированная система оптимизации доменной плавки. «Сталь», 2004, №3, с. 7–13.
30. 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.
31. В.М. Паршаков, Н.М. Бабушкин, В.А. Заболотский и др. Устройство для контроля распределения температуры газа по радиусу колошника доменной печи. Авторское свидетельство СССР №1016363. «Открытия. Изобретения», 1983, № 17, с. 12.
32. 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.
33. А.А. Третяк, В.М. Паршаков, В.А. Борисенко и др. Достоверность информации о распределении газового потока по радиусу колошника доменной печи, получаемой разными способами измерений. Металлургия чугуна — вызовы XXI века. Труды VIII Международного конгрессов доменщиков. — М: Издательский дом «Кодекс», 2017. — С. 302–308.
34. Большаков В.И. Теория и практика загрузки доменных печей. — М.: Металлургия, 1990. — 255 с.
35. 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.
36. Г.Г. Ефименко, А.А. Гиммельфарб, В.Е. Левченко. Металлургия чугуна. Изд. 2. Киев, Издательское объединение «Вища школа». 1974. 488 с.
37. В.И. Коротич, С.Г. Братчитков. Металлургия чёрных металлов: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1987, 240 с.
38. М.А. Павлов. Металлургия чугуна. Часть II. Доменный процесс. Изд. 6. М., Металлургиздат, 1949, 628 с.
39. В.Г. Воскобойников, В.А. Кудрин, А.М. Якушев. Общая металлургия. М., «Металлургия», 1985, 479 с.
40. А.А. Гиммельфарб, Г.Г. Ефименко. Автоматическое управление доменным процессом. М., «Металлургия», 1969, 309 с.
41. 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.
42. В.А. Заболотских, В.М. Паршаков, Ф.Р. Шкляр. Методика и результаты расчета температур в фурменных очагах доменной печи на основе информации датчиков теплосъёма. «Производство чугуна». Межвузовский сборник. Издательство УПИ. Свердловск, 1985 г., с. 74–78.
43. D.A. Shnayder, L.S. Kasarinov, T.A. Barbasova, A.V. Lipatnikov. Dada mining and model-predictive approach for blast furnace thermal control // 2017 Intelligent Systems Conferenct (IntelliSys), 2017, pp. 653–660. DOL: 10. 1109/ IntelliSys.2017.8324364.
44. L.S. Kasarinov, T.A. Barbasova. Identification method of blast furnace process parameters // V Internation Conference for young scientists «High Technology: Research and Application 2015 (HTRA 2015), Key Engineering Materials, Vol. 685, pp. 137-141, Mar. 2016 DOL: 10.4028/www. Scientific.net/KEM.685.137.
45. L.S. Kasarinov, T.A. Barbasova. Elliptic component analysis // 2016 2 nd Internation Conference on Industrial Engineering, Application and Manufacturing, ICIEAM 2016 — Proceedings 7910936 DOL: 10.1109/, ICIEAM 2016.7910936.

В.М. Паршаков, В.А. Борисенко, ООО «АКОММ»
И.Е. Прохоров, П.Ю. Довженко, ПАО «ММК»
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»

НЕПРЕРЫВНЫЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ КАЖДОГО ФУРМЕННОГО ОЧАГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОСЪЁМА И УПРЕЖДАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ НА ЭТОЙ ОСНОВЕ НАГРЕВА ГОРНА И ПРОГНОЗ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ В ЧУГУНЕ

Процессы, проходящие в горне доменной печи и в важнейшей его части (в фурменных очагах), занимают важное место в работе доменной печи. От них, в конечном итоге, зависит эффективность её работы и качество выходящего из печи чугуна. К сожалению, контроль работы горна доменной печи может быть осуществлен только через фурменные очаги. Мастер печи регулярно проверяет визуальным осмотром «светимость» фурменным очагов (ФО), т.к. они, во-первых, являются одним из важнейших объектов доменной печи; во-вторых, последним местом, где можно контролировать проходящие в доменной печи процессы и успеть принять необходимые меры.

В фурменной зоне проходит:

- горение кокса и его заменителей (природного газа, пылеугольного топлива, мазута) за счет кислорода дутья (естественного и дополнительно введенного) с образованием горнового газа определенного количества, состава и температуры;
- прохождение части продуктов плавки, их нагрев и окисление;
- выделение большого количества тепла, разделение его между газом и продуктами плавки. В итоге из фурменного очага продукты плавки выходят со значительно более высокой температурой, чем на входе;

- передача тепла излучением от газа к оболочке фурменного очага и воздушным фурмам (ВФ) и, как следствие, к охлаждающей воде. В итоге, из фурменных очагов газы выходят с балансовой температурой газов значительно более низкой, чем, так называемая, теоретическая температура горения. На каждой воздушной фурме по переданному теплу (теплосъёму) можно определить температуру в фурменном очаге.

В 1974 на Всесоюзной научно-технической конференции в г. Киеве [1] была представлена математическая модель газодинамических, тепло- и массообменных процессов в горне доменной печи («Модель горна» — МГ), которая получила дальнейшее развитие [2–4]. Особое внимание в МГ уделяется процессам, протекающим в фурменном очаге доменной печи.

В «Модели горна» учитывается:

- образование и размеры фурменных очагов;
- горение кокса и его заменителей;
- прохождение продуктов плавки через фурменные очаги и окисление в них ранее восстановленного железа;
- распределение выделившегося от окисления железа тепла между продуктами плавки и газами;
- передача тепла излучением от газов к оболочке фурменных очагов и расплаву;
- термохимические процессы, протекающие в зоне «доводки», включая вторичное восстановление железа, окислившегося в фурменных очагах, и прямое восстановление примесей чугуна;
- физические потери тепла, в т.ч. с охлаждающей ВФ водой.

Естественно, что проводимый визуальный контроль фурменного очага субъективен.

Экспериментальные исследования фурменных очагов, проведенные с 1978 по 1980 г.г. на Магнитогорском МК (ДП-9 и ДП-6) [5–8] позволили определить путем замера протяженность фурменного очага, температуру, состав газа и материалов. В итоге по результатам экспериментов было получено выражение для определения Lфо [5, 6] и получены значения эффективных температур газа в фурменном очаге [7]. Эти исследования позволили внести корректировку в «Модель горна».

Также были проведены замеры температуры фурменных очагов с помощью:

— пирометров [9];

— датчиков теплового потока (ДТПФ; датчик ввертывался в «рыло» ВФ [10, 11]);

— датчиков теплосъёма (ДТФЗ; контроль количества тепла, передаваемого из ФО на ВФ [11–14].

Метод измерения температуры фурменных очагов пирометрами сложный из-за фокусирования направляемого потока инфракрасного излучения на «ядро» измеряемого потока газа, а не на оболочку фурменных очагов, что имело место обычно на практике. Это, по-видимому, является причиной того, что многочисленные попытки контроля температуры фурменных очагов с помощью разного типа пирометров закончились неудачей. В настоящее время эти устройства на доменных печах не работают.

Два другие метода (с помощью ДТПФ и ДТФЗ) контроля температуры ФО были успешно испытаны во время I периода исследований на ММК с 1978 по 1986 гг. [8, 11–16].

Задача разработки датчиков автоматического контроля температуры фурменных очагов (Тфо) была поставлена для адаптации МГ [5–7], а также для контроля неравномерности тепловой работы ФО по окружности горна доменной печи. Было принято, что для оперативного контроля Тфо наиболее целесообразно использовать информацию о тепловом воздействии фурменного очага на тело воздушной фурмы. Для получения этой информации были разработаны, изготовлены и установлены на шести равномерно расположенных по окружности горна фурмах ДП-10 ММК ДТПФ и ДТФЗ.

Метод с использованием ДТПФ основан на измерении плотности теплового потока из фурменного очага на торцевую часть дутьевом фурмы, в которую вворачивается датчик. Соединительные проводники выводятся через сальник, устанавливаемый на отводящем патрубке охлаждения фурмы. Возможен простой способ пересчета сигнала датчика в Тфо. Результаты расчета Тфо по показаниям датчиков теплового потока, установленных на ДП-10 ММК, показали, что неравномерность температурного уровня фурменных очагов может быть очень большой. При разнице средних за период значений температур в 350 °С в отдельных случаях эта разница достигала 500 °С. При значительной пульсации значений Тфо во времени пределы их колебаний остаются практически постоянными, что говорит об устойчивом

характере неравномерности работы фурменных очагов. Датчик в период эксплуатации ВФ от ее установки и её смены в обслуживании не нуждался.

Аналогичные данные получены при расчете Тфо по информации, полученной с помощью ДТФЗ. Метод контроля теплосъёма заключался в измерении количества воды, протекающей через фурму, и разности температур воды на входе в фурму и выходе из нее. По этим параметрам определялось количество тепла, поступившее на воздушную фурму от фурменного очага. Метод отличается простотой и эксплуатационной надежностью. Как показали исследования, датчик даёт представительную информацию о Тфо и имеет высокий уровень связи с содержанием кремния последнего и последующих выпусков.

Проведенные исследования показали возможность использования разработанных датчиков для автоматического контроля Тфо доменных печей, регулирования расхода заменителей кокса (природный газ, мазут и угольная пыль) по фурмам из условия поддержания равенства Тфо по окружности горна, адаптации модели горна к реальным условиям плавки, прогноза содержания кремния в чугуне предстоящего выпуска. Расчет проводился с использованием самонастраивающейся статистической модели по показаниям шести ДТПФ и значениям содержания кремния в чугуне предшествующих выпусков.

На основании аналитических и экспериментальных исследований фурменных очагов были внедрены с положительным эффектом на доменных печах Союза следующие технологические мероприятия:

1. Эксплуатация доменных печей без использования смесителя горячего дутья. Показано, что изменение температуры горячего дутья ($t_д$), например, на 150 °С хотя и изменяет $Т_т$ на 115°С, но балансовую температуру газа, выходящего из фурменных очагов и вступающих в теплообмен с шихтовыми материалами ($Т''_з$), изменяет только на 30°С [8]. Данное обстоятельство позволило внедрить в 1975 г. на доменных печах НТМК режим работы без смесителя [17]. Последнее позволило поднять $t_д$ на 30°С при ее колебании в период перевода воздухонагревателей с режима нагрев на дутье до 100°С. В последствии почти все доменные печи Союза перешли на работу без смесителя. Так, например, на ММК (ДП-6) в 1979 г. при работе на двух ВН и увеличении длительности периода дутья с 3 до 4 часов колебания $Т_д$ (при работе без смесителя) доходили до 150°С. Это не мешало работе печи, но позволило поднять $t_д$ на 60°С [8] с соответствующим положительным эффектом.
2. В 1978 г. с помощью «Модели горна» были выявлены причины массового горения воздушных фурм (сгорало до 94 фурмы в месяц) на ДП-9 «Криворожстали». После сбора необходимых данных за два месяца работы печи, используя «Модель горна» были просчитаны следующие параметры фурменных очагов ДП-9:
   - протяженность фурменных очагов;
   - температура продуктов плавки на входе в фурменную зону;
   - температура оболочки фурменных очагов;
   - балансовая температура газов в фурменных очагах, 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;
   - температура продуктов плавки на входе в зону «доводки».

В результате анализа было установлено, что основное влияние на горение фурм оказывает $t''_з$, которая достигала на печи в тот период 2350 °С. Было установлено, что $t''_з$ не должна превышать 2100°С. Расчеты с использованием «Модели горна» показали, что для исключения горения фурм на печи надо увеличить расход природного газа с 35 000 до 50 000 м³/час, что и было в итоге сделано. Горение фурм прекратилось [18]. Необходимо отметить, что в настоящее время на всех доменных печах ММК эта температура редко превышает 2100°С.

3. В 1979 г. в связи с переходом ДП-7 ММК на работу с трех на два ВН $t_д$ упала с 1140°С до 730°С. Расчеты по МГ [8] показали, что в числе отрицательных факторов, имело место снижение Lфо с 1,45 до 1,05 м [8]. На основании расчетов по МГ для частичной компенсации отрицательного влияния снижения $t_д$ было внедрено одновременное уменьшение диаметра воздушных фурм на печи ($d_ф$) с 180 мм до 170 мм и числа работающих фурм с 16 до 14 штук. Оба эти фактора привели к увеличе-

нию протяженности ФО с 1,05 до 1,25 м, их горизонтального сечения и поверхности. Это увеличило скорость схода шихтовых материалов, количество окислившего в фурменных очагах железа и выделившегося при этом тепла, аккумуляцию этого тепла продуктами плавки. Это, наряду с увеличением количества тепла, переданного излучением от газов к материалам (вследствие увеличения поверхности фурменных очагов), привело к увеличению прогрева продуктов плавки в фурменных очагах; повышению запаса тепла в продуктах плавки, вступающих в зону «доводки»; увеличению восстановления кремния в этой зоне и повышению его с содержания в чугуне. Для восстановления заданного состава и нагрева чугуна была понижена температура материалов на выходе из «шахты» печи. Понижение температуры материалов на выходе из шахты печи позволило увеличить расход природного газа почти до первоначального уровня с соответствующим снижением расхода кокса (до 26 кг/т чугуна). При восстановлении работы ДП-7 на трёх ВН и при соответствующем восстановлении $t_д$ уменьшение диаметра фурм на ДП-7 было сохранено.

Таким образом, в 1979 г. впервые на комбинате был уменьшен $d_ф$ с 180 (он был таким на всех десяти печах комбината) до 170 мм с существенным положительным эффектом. С той поры изменение диаметра фурм в сторону их уменьшения являлось для руководства цеха и комбината эффективным мероприятием управления доменной плавкой: $d_ф$ на некоторых печах доведен в настоящее время до 140 мм. Важно подчеркнуть, что по этому пути шли на всех доменных печах мира. В Японии дошли до 130 мм.

4. Поскольку расчетами по модели горна было показано отрицательное влияние на работу доменной печи уменьшения Lфо и это было подтверждено на практике, то было остановлено решение об установке косых фурм на всех доменных печах ММК: направляя струю дутья в слой кокса, размещающийся ниже фурменных очагов, уменьшится их протяженность. Это привело бы к уменьшению активной зоны в горне печи. Дальнейший мировой опыт показал справедливость этого решения.

В 2006 г. началось этапное внедрение на доменных печах ММК автоматизированной системы контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки (АСКОП ДП) с использованием результатов проведенных ранее аналитических и экспериментальных исследований газодинамических, тепло- и массообменных процессов по высоте (от уровня засыпи до чугунной лётки) и сечению (по радиусу колошника и окружности колошника и горна) печи, включая непрерывный автоматически контроль параметров зоны плавления (формы, местоположения и толщины). Естественно, что ряд локальных систем решали задачи контроля, оптимизации и прогноза процессов в горне печи особенно в фурменных очагах (системы 1.3, 1.5, 2.3, 2.4, 2.6 и 3.1 таблицы 1).

Таблица 1. Автоматизированная система контроля, оптимизации и прогноза доменной плавки (АСКОП ДП), внедренная на доменных печах ПАО «ММК»

Наименование групп систем	Наименование локальных систем	№ печи на ММК	Год внедрения на ММК
1. КОНТРОЛЬ	1.1) радиального газораспределения на колошнике	2, 4, 6, 9, 10	2006
	1.2) окружного газораспределения на колошнике	2,10	2011
	1.3) окружного газораспределения в горне	2	2011
	1.4) материального и теплового балансов плавки	2; 10; 4, 6, 9	2013; 2016; 2017
	1.5) нагрева «шахты» и горна печи	все печи	2008
	1.6) параметров зоны плавления	2; 10; 4, 6, 9	2014; 2016; 2017
2. ОПТИМИЗАЦИЯ	2.1) газодинамического режима плавки	все печи	2008
	2.2) радиального распределения на колошнике	2, 4, 6, 9, 10	2011
	2.3) окружного газораспределения на колошнике	2, 10	2011
	2.4) окружного газораспределения в горне печи	2	2011
	2.5) восстановительных процессов плавки	2; 10; 4, 6, 9	2013; 2016; 2017
	2.6) теплового состояния печи	все печи	2009
	2.7) параметров зоны плавления	2; 10; 4, 6, 9	2014; 2016; 2017
3. ПРОГНОЗ	3.1) содержания кремния в чугуне	2	2011

С 2011 г., после установки датчиков расхода воды на входе и выходе каждой фурмы на ДП-2 для контроля прогара фурм, по настоящее время регулярно контролируется температура фурменных очагов (Тфо) и выполняется прогноз содержания кремния в чугуне предстоящих выпусков с использованием показаний датчиков теплосъёма.

В настоящее время особое внимание уделяется изучению влияния Тфо на производительность печи, удельный расход кокса и содержание кремния в чугуне.

Полученные данные показали исключительное влияние процессов в фурменных очагах доменной печи на её работу. Реализация на доменной печи системы прогноза нагрева горна (через прогноз содержания кремния в чугуне вперёд на один — два выпуска чугуна) позволит стабилизировать содержание кремния в чугуне и избежать неконтролируемых его изменений из-за непостоянства химического анализа железорудных материалов, возможных ошибок в нём и в принимаемых решениях по управлению плавкой. Это повысит эффективность работы как доменного, так и кислородно-конверторного цехов.

Проводимая ПАО «ММК» в настоящее время работа по совершенствованию управления технологическим процессом доменной плавки с помощью математических моделей, реализованных в составе АСУ ТП, частью которой является настоящая работа, является важным вкладом в развитие в России технологической революции, цифрофизации экономики, интеллектуализации её управления, внедрения «Big Data» и т.д., объединяемые общим понятием «Индустрии 4.0».

Список литературы

1. В.М. Паршаков, Б.А. Боковиков, Ф.Р. Шкляр. Математическая модель процессов тепло — и массообмена в фурменных очагах доменной печи. «Проблемы автоматизированного управления доменным производством». Киев, 1977, с. 18.
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. 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.
4. 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.
5. 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.
6. П.Б. Федотов, В.М. 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.
7. 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.
8. 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.
9. В.К. Дурнов. Интенсивность излучения фурменных очагов и применение этого параметра для оценки теплового состояния низа печи. «Автоматизация доменного процесса». «Металлургия». М., 1966 г., с. 135–146.
10. П.Б. Федотов, Н.М. Бабушкин. Разработка датчика и исследование плотности теплового потока от фурменного очага. «Металлургическая теплотехника». Сборник трудов. «Металлургия», М., 1981, с. 14–19.

11. В.А. Заболотских, П.Б. Федотов, В.М. Паршаков и др. Контроль температуры газов и материалов в фурменных очагах доменной печи по информации датчиков теплосъёма и теплового потока воздушных фурм. «Проблемы автоматизированного управления доменным производством». Выпуск 6. ЦНИИТЭ Приборостроения. М., 1983, с. 42–43.
12. 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.
13. 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.
14. Заболотских В.А., Паршаков В.М., Шкляр Ф.Р. Методика и результаты расчета температур в фурменных очагах доменной печи на основе информации датчиков теплосъёма.// Производство чугуна: Межвузовский сборник — Свердловск: УПИ, 1985. С. 74–78.
15. В.М. Паршаков. Автоматизированная система оптимизации доменной плавки. «Сталь», 2004, № 3, с. 7–13.
16. В.М. Паршаков. Пути повышения эффективности использования пылеугольного топлива в доменной печи. «Сталь», 2005, № 8, с. 1.
17. Ф.Р. Шкляр, Н.М. Бабушкин, Б.Б. Вегнер, В.М. Паршаков и др. Расчетно-теоретические и промышленные исследования режимов работы воздухонагревателей без смесителя. «Металлургическая теплотехника». Тематический отраслевой сборник № 5. М., «Металлургия», 1976, с. 5–10.
18. 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

Ю.А. Чесноков, ИМЕТ УрО РАН

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА «ИНТЕРАКТИВНЫЕ РАСЧЕТЫ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ»

Современный этап развития металлургической промышленности России характеризуется ориентацией на широкое внедрение инновационных высокотехнологичных производств. В этой связи при принятии обоснованных решений для эффективного развития как отечественного металлургического комплекса в целом, так и отдельных промышленных предприятий, становится необходимым проведение системного анализа и технико-экономической оценки существующего состояния металлургического предприятия и параметров предполагаемых инновационных мероприятий. Специфика на предприятиях черной металлургии России заключается в сложности, многомерности и высокой динамике изменений показателей работы металлургических агрегатов, анализ работы которых осуществляется в условиях неопределенности, вызванной наличием факторов, не всегда поддающихся строгой количественной оценке.

В этой связи особую актуальность приобретает научная проблема разработки интегрированной информационной системы, при использовании которой конечный пользователь способен, с одной стороны, обрабатывать всю систему разнообразной информации о текущем состоянии металлургических объектов и анализировать предполагаемые инновационные мероприятия, а с другой — иметь возможность функционального наращивания и масштабируемости такой системы за счет добавления новых программных модулей для расчета технико-экономических показателей металлургических переделов.

Исходными данными для создания информационной системы (ИС) являются результаты предыдущих научных исследований в ИМЕТ УрО РАН по математическому моделированию тепло- и массообменных процессов в металлургических агрегатах [1–3].

Реализация поставленной цели предполагала поэтапное решение следующих задач:

- выбор инструментария, программного обеспечения для технического проектирования и поддержки приложений информационной системы;
- разработка и совершенствование алгоритмов и программного обеспечения для математических моделей, обеспечивающих расчет технико-экономических показателей по соответствующим металлургическим переделам;
- формирование единой базы данных для всех разработанных моделей;
- создание общей интегральной информационной системы, тестирование и отладка функциональных возможностей полученных программных модулей для выявления и исправления критических ошибок;
- обеспечение скорости сетевых соединений, безопасности доступа к информационной системе, повышение надежности и отказоустойчивости информационной системы.

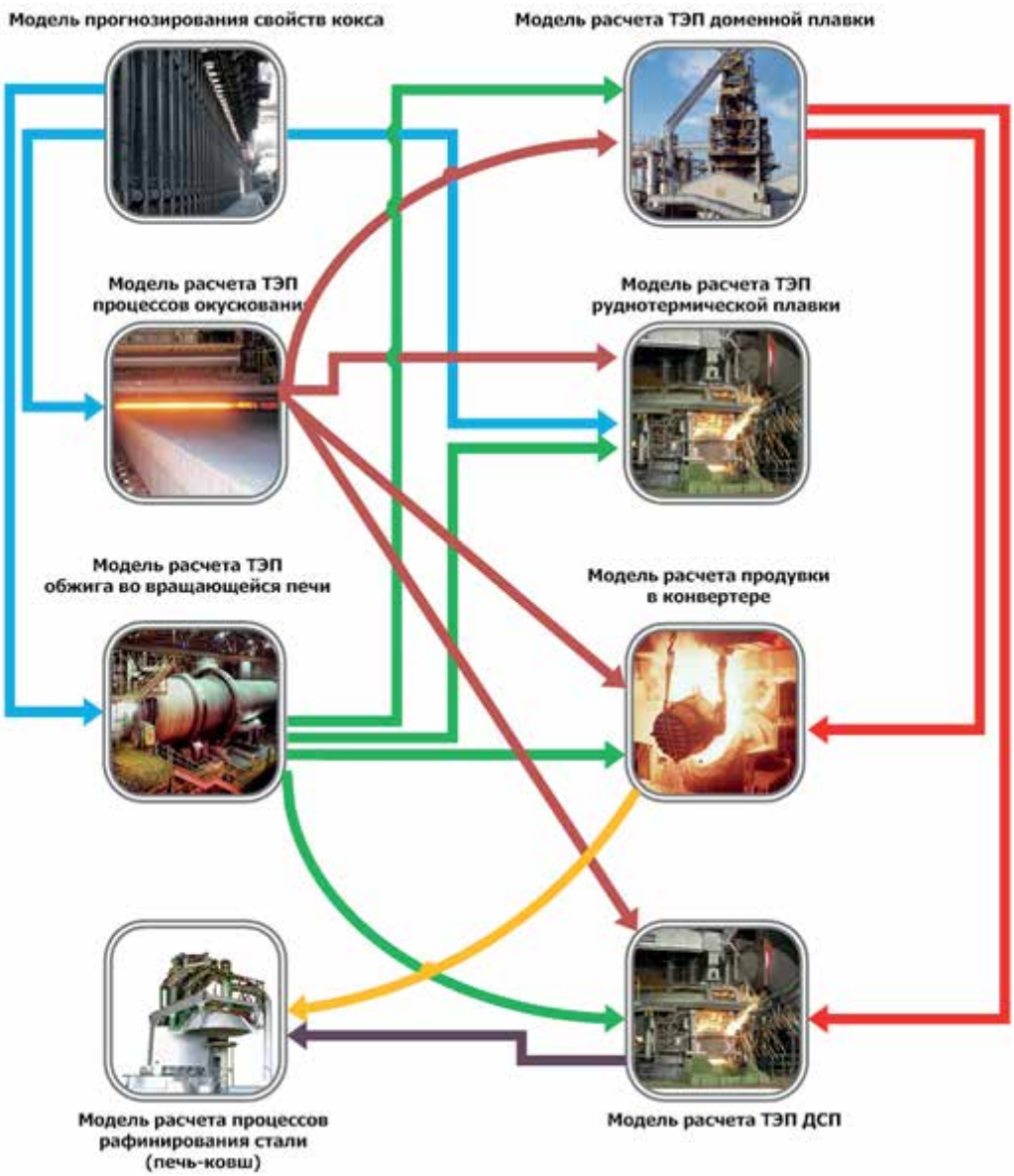


Рис. 1. Структура взаимосвязей в ИС «ICIM»

В ИС «Интерактивные расчеты в черной металлургии» (ИС «ICIM») реализован следующий функционал: хранение, ввод, редактирование информации и исходных данных для расчетов с возможностью выборки и сортировки в соответствии с отображаемыми полями редактирования; возможность проведения таких операций, как передача результатов вычислений из одной модели в другую; возможность быстрого ввода новых исходных данных на основе копирования и редактирования существующих записей; архивирование исходных данных и результатов расчетов; печать исходных данных; авторизированный доступ, разграничение прав доступа по группам пользователей ИС.

Для решения поставленной задачи были определены инструментарий среды быстрой разработки (RAD) компании Embarcadero с использованием в качестве языка программирования C++, а также выбрана система управления базой данных (СУБД) этой же фирмы.

В соответствии с требованиями, изложенными выше, разработан программный модуль, который состоит из главного интерфейсного окна, содержащего доступ к элементам меню для интерактивного формирования базы исходных данных и доступа к собственно расчетным модулям с последующим выводом результатов соответствующего расчета. На Рисунке 1 приведена общая схема, характеризующая структуру информационной системы и связей между различными расчетными модулями.

Основной программный модуль состоит из главного окна (Рисунок 2), в состав которого входит ленточное меню с элементами выбора соответствующего варианта расчета, окна редактирования исходных данных, в которых последовательно можно выбрать материалы из базы данных, посмотреть расчетный состав смесей выбранных компонентов.

Рис. 2. Главное окно информационной системы

1. МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОКСА

В основе модели лежит использование в качестве исходных данных показателей качества углей по международной системе кодификации (Quality specifications according International System Codification), используемых при коксовании. Для прогнозирования качественных характеристик

кокса используется метод расчета отклонений от базовых (усредненных) значений с использованием показателя отражения витринита (R_o), содержания летучих (V^{daf}), серы (S^d), зольности (A^d) и индекса основности золы угля (концентрата) (I_b).

Таблица 1. Базовые значения исходных данных и показателей процесса коксования

A^d,%	V^{daf},%	R_o	I_b	CRI^B,%	CSR^B, %
9.0	28.0	1.1	3.0	30.0	55.0

В определяемые расчетные значения входят материальный баланс процесса коксования, основные металлургические свойства кокса (прочность, реакционная способность) при использовании углей и концентратов различных угольных месторождений.

2. МОДЕЛЬ ОКУСКОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ

За основу взята математическая модель, разработанная в Институте металлургии УрО РАН, предназначенная для расчета технико-экономических показателей процесса окускования [3]. Текущий алгоритм модуля позволяет рассчитать тепловой и материальный балансы, среднюю температуру спека на выходе процесса, себестоимость процесса окускования с оптимизацией по различным критериям, таким как основность окускованного продукта, содержание целевого компонента (FeO). Также реализована возможность передачи полученного расчетного состава окускованного продукта в другой металлургический передел, например, в доменную плавку или обжиг во вращающейся печи (рисунок 1).

3. МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ (ТЭП) ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

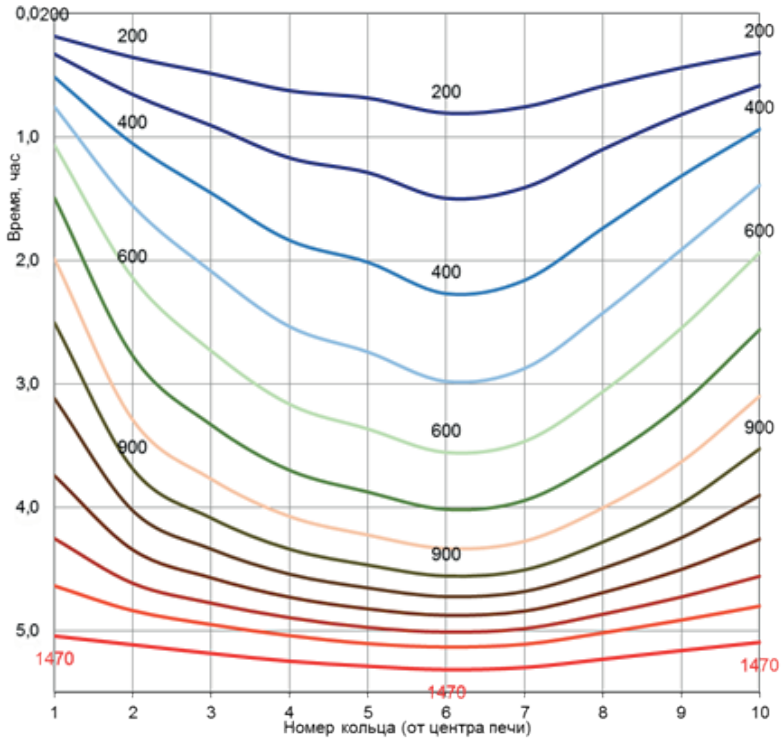


Рис. 3. Изотермы температур материала по радиусу доменной печи

Основные положения математической модели и алгоритм расчета показателей доменной плавки изложены в [2]. На основе сертифицированных исходных данных металлургического сырья производится расчет теплового и материального баланса плавки, температурных кривых газа и шихты, температур плавления и кристаллизации доменного шлака, диаметра фурм, себестоимости чугуна. В зависимости от постановки задачи предусмотрено использование схемы расчета по одно- или двумерной математической модели процессов теплообмена и восстановления. На этапе разработки двумерной модели в алгоритм расчета были внесены изменения по учету неравномерности распределения шихты и газа по радиусу печи с помощью задания характерной кривой CO_2 для десяти равновеликих по площади колец, которую теперь можно задавать либо аналитически, либо по практическим данным. По результатам расчета возможно построение кривых теплообмена для одно- и двумерной модели.

Также усовершенствован блок восстановления оксидов железа в сухой части шахты доменной печи. При этом рассчитываются количественные характеристики процесса восстановления для каждого железорудного компонента шихты со своими индивидуальными металлургическими характеристиками. Это существенно повышает прогнозные возможности модели для решения вопросов о распределении различных по свойствам и характеристикам железорудных материалов по радиусу доменной печи.

4. МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЭП КОНВЕРТЕРНОГО ПЕРЕДЕЛА

Расчет кислородно-конвертерной плавки предусматривает определение выхода металла и шлака, состав конечного шлака по заданной основности или содержанию FeO, конечную температуру металла, содержание металловключений и дисперсного железа в шлаке, состав отходящего газа, расчет материального и теплового баланса моно— и дуплекс процессов при продувке чугуна.

5. МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ОБЖИГА И МЕТАЛЛИЗАЦИИ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Модель позволяет определить химический состав смеси руд, материальные и тепловые характеристики компонентов шихты, расход технологического топлива, флюса, количество и состав выделяющегося из шихты газа, характеристики энергетического топлива, адиабатическую температуру горения и состав факельного газа при $\alpha < 1{,}0$ и $\alpha \geq 1{,}0$, количество и состав валового металлизованного продукта и пыли, расход энергетического топлива, количество и состав отходящего газа, расходные коэффициенты на тонну металлизованного продукта или огарка, выход пыли, газа, производительность печи.

6. МОДЕЛИ РАСЧЕТА ПЛАВКИ В РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ (РТП) И ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ (ДСП)

Предусмотрен расчет теплового и материального баланса, производительности печи, удельного расхода электроэнергии, конечного состава и выхода металла и шлака, экономических показателей процесса.

7. МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО И МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА ПРОЦЕССА РАФИНИРОВАНИЯ В СТАЛЬ-КОВШЕ

Модель позволяет определить требуемое количество раскислителей и добавок для заданного состава металла с учетом количества и состава шлака, материальный и тепловой баланс плавки. Исходными данными для процесса рафинирования являются результаты расчетов по составу металла из других металлургических переделов (конвертерной плавки, электросталеплавильного производства и т.п.).

Алгоритм и последовательность расчета для всех моделей практически идентичен (рисунок 4).

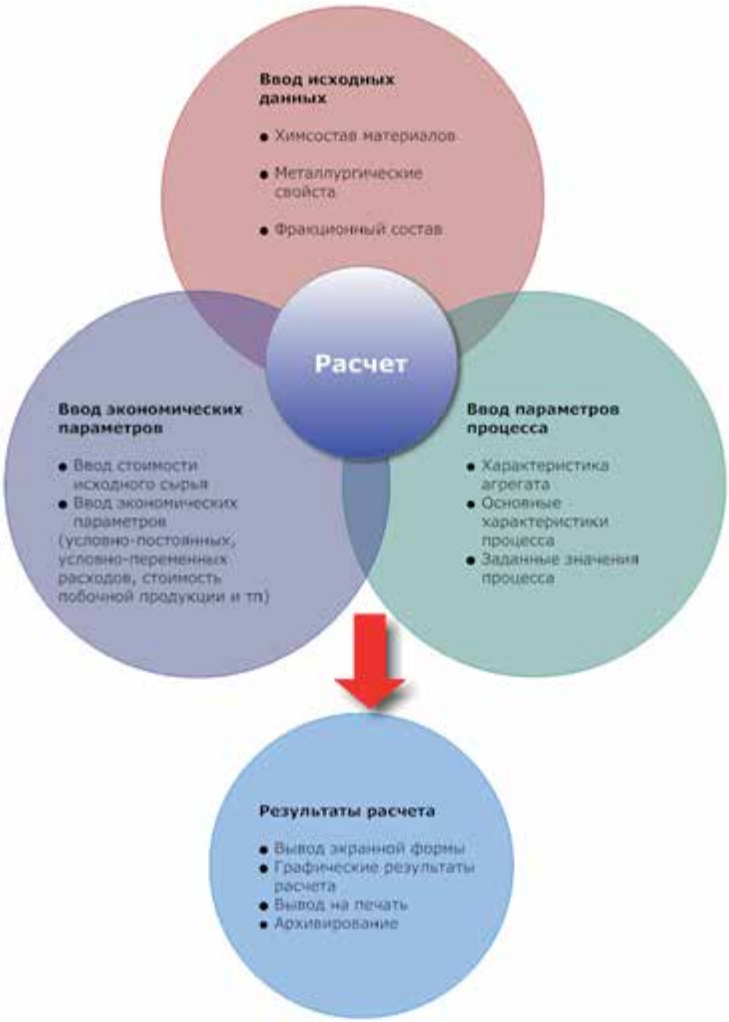


Рис. 4. Последовательность и этапы расчета в моделях информационной системы

Исходные данные и результаты расчетов по всем переделам оформляются в виде табличных данных с возможностью печати или записи в файл требуемого формата (PDF, MS EXEL, MS WORD). Для сохранения отчетов предусмотрен режим архивирования исходных данных каждого расчетного модуля и общей базы данных. Для сетевого обмена предусмотрен авторизированный доступ и разграничение прав доступа по группам пользователей информационной системы. В перспективе планируется добавить в состав информационной системы математические модели по прямому получению железа (Midrex, HYLL III, ITMK3), модели сталеплавильного производства, совершенствование алгоритма расчетов по прогнозированию металлургических свойств кокса и доменного производства. Также планируется перевести информационную систему в независимые кроссплатформенные web-приложения с возможностью интерактивных расчетов по Интернету.

Таким образом, на основе ранее и вновь созданных математических моделей с использованием единой базы данных впервые разработана информационная система «Интерактивные расчеты в черной металлургии», позволяющая обеспечить максимальную доступность и интеграцию сквозных расчетов по металлургическим переделам, повысить уровень контроля и анализа, планирования и прогнозирования результатов текущей производственной деятельности на металлургических предприятиях.

Разработанная информационная система может использоваться на этапе проектирования новых производств и модернизации металлургических агрегатов, а также служить методологическим инструментом при решении разнообразных учебных и образовательных проблем.

Список литературы

1. Абрамов, С.Д. Макрокинетика восстановления железорудных материалов газами. Математическое описание / С.Д. Абрамов, Л.Ф. Алексеев, Д.З. Кудинов, А.В. Ченцов, С.В. Шаврин. М.: Наука, 1982. — 104 с.
2. Ченцов, А. В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса [Текст]: монография / А.В. Ченцов, Ю.А. Чесноков, С.В. Шаврин. — Изд. 2-е доп. и перераб. — Екатеринбург: НИСО УрО РАН, 2003. — 163 с.
3. Чесноков, Ю.А Расчет показателей окускования руд (описание алгоритма) [Текст]: препринт / Ю.А. Чесноков, А.В. Ченцов, С.В. Шаврин // Математическое моделирование доменного процесса. — Екатеринбург: УрО РАН, Институт металлургии, 1994. — С. 52–70.
4. Коротич, В.И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке [Текст] : учеб. для вузов по спец. Металлургия чер. металлов / В.И. Коротич. — М.: Металлургия, 1978. — 206 с.
5. Бабошин, В.М. Теплофизические свойства топлив и шихтовых материалов черной металлургии [Текст]: справ. / В.М. Бабошин, Е.А. Кричевцов, В.М. Абзалов, Я.М. Щелоков. — М.: Металлургия, 1982 . — 150 с.
6. Металлизация и электроплавка железорудного сырья [Текст] : практ. пособие / А.И. Гиммельфарб [и др.] — М.: Металлургия, 1981, — 152 с.
7. Бигеев, А.М. Упрощение расчета плавки стали в кислородных конвертерах [Текст]: учеб. пособие / А.М. Бигеев, В.И. Селиванов. — Магнитогорск; Магнитог. горно-металлург. ин-т им. Г.И. Носова. Каф. металлургии стали: Б. и., 1989. — 36 с.
8. Савельев, Г.П. Производство крицы [Текст]: науч. изд. / Г.П. Савельев. — М.: Металлургиздат, 1963. — 99 с.
9. Богданов А.И. Вращающиеся печи цементной промышленности [Текст]: учеб. пособие для технических спец. химико-технологических вузов и фак. / А.И. Богданов. — М.: Машиностроение, 1965. — 320 с.
10. Лисиенко В.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология [Текст]: справ. издание: В 2-х книгах. Книга 1. / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисенко. — М.: Теплотехник, 2004. — 687 с.
11. Лисиенко, В.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология [Текст]: справ. издание: В 2-х книгах. Книга 2. / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисенко. — М.: Теплотехник, 2004. — 585 с.
12. Бигеев, А.М. Математическое описание и расчеты сталеплавильных процессов [Текст]: учеб. пособие для студ. металлург. спец. вузов / А.М. Бигеев. — М.: Металлургия, 1982 . — 158 с.
13. Гасик, М.И. Теория и технология электрометаллургии ферросплавов [Текст]: учеб. для вузов / М.И. Гасик, Н.П. Лякишев — М., СПб : Интермет Инжиниринг, 1999. — 764 с.

Д.А. Шнайдер , А.В. Липатников, А.Е. Шмелёва,
Е.В. Астратова, А.А. Полинов, А.В. Колосов, И.Е. Прохоров,
ПАО «ММК»
Т.А. Барбасова, Л.С. Казаринов, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ)

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРВОГО ПЕРЕДЕЛА ПАО «ММК» НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МОДЕЛЬНО-УПРЕЖДАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

АННОТАЦИЯ

Целью работы является повышение эффективности производства чугуна с учетом оценки влияния на себестоимость стали на основе внедрения комплексного подхода к оптимизации первого передела ПАО «ММК» с использованием методов модельно-упреждающего управления и интеллектуального анализа данных.

Данные разработки ориентированы на создание АСУ ТП новой структуры, содержащей подсистему интеллектуального анализа данных, подсистему оперативного, адаптивного и технико-экономического управления доменным процессом.

В статье описаны общие теоретические подходы и основные результаты внедрения систем оптимизации и управления в первом переделе ПАО «ММК».

На верхнем технико-экономическом уровне управления разработаны математические модели оптимизации привоза и потребления угольного и железорудного сырья в ПАО «ММК». На основе методов кластерного анализа и искусственных нейронных сетей разработана автоматизированная информационная система «Оптимальный чугун», обеспечивающая расчет оптимальных значений качества кокса и доли агломерата

индивидуально для доменных печей по критериям: максимум производства чугуна, минимум себестоимости чугуна, минимум себестоимости стали.

На нижнем уровне оперативного управления в качестве основного критерия модельно-упреждающего управления используется стабилизация теплового состояния печи в соответствии с заданиями — локальными целями управления, формируемыми на верхнем уровне системы. При этом учитываются динамические характеристики доменного процесса в условиях вариаций параметров качества, структуры, гранулометрического состава доменной шихты, параметров дутья, ритмичности выпусков чугуна и других параметров. Для повышения точности и надежности работы системы–советчика выполняется адаптация динамических характеристик системы управления на основе применения методов идентификации параметров в режиме реального времени.

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 Товаровского И.Г., Готлиба А.Д., Ефименко Г.Г., Гиммельфарба А.А., Похвиснева А.Н., Онорина О.П., Спирина Н.А., Рамма А.Н., Дмитриева А.Н. [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, работы в данной области продолжаются.

Особенностями подхода, предлагаемого в данной работе являются:

- использование программных средств глубинного анализа статистических данных эксплуатации (Data Mining) для выявления эффективных областей значений режимных параметров печи, обеспечивающих повышение производительности и снижение потребления кокса;
- наличие программы идентификации в реальном времени текущих параметров оперативного управления доменным процессом с целью повышения его эффективности.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ УПРАВЛЕНИЯ АГЛО-КОКСО-ДОМЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

На верхнем технико-экономическом уровне управления разработаны математические модели оптимизации привоза и потребления угольного и железорудного сырья в ПАО «ММК».

В ПАО «ММК» с февраля 2017 года внедрена в промышленную эксплуатацию модель оптимизации привоза и потребления угольного сырья. В модели оптимизации привоза и потребления угольного сырья в ПАО «ММК» осуществляется расчет показателей качества кокса и расчет оптимизации привоза и потребления угольного сырья [45–46].

Данная модель основана на изучении работы коксохимического и доменного передела ПАО «ММК» с 2011 года. Основным методом определения показателей качества кокса по модели является расчетно-статистический, в основе которого лежит метод определения статистической зависимости между показателями качества угольной шихты и показателями качества кокса. Наличие данных зависимостей позволяет применять оптимизацию не к показателям качества угольной шихты, а к показателям качества кокса, что дает большую вариативность при расчете оптимального привоза и потребления угольных концентратов [47].

Результатом расчета оптимального привоза и потребления угольных концентратов является оптимальная структура привоза и потребления угольных концентратов с указанием количества и стоимости закупаемых и расходуемых угольных концентратов, прогнозом качества угольной шихты и кокса, а также анализ чувствительности расчета к ценам на угольные концентраты и расчет экономического эффекта для сравнения оптимальной структуры угольной шихты с базовым периодом.

По состоянию на январь 2019 г. модель привоза и потребления ЖРС находится в стадии опытно-промышленной эксплуатации и уже используется для обеспечения минимально возможной стоимости сырья при соблюдении всех контрактных и технологических требований в комплексе программ по снижению себестоимости чугуна на ПАО «ММК». Модель охватывает как агломерационный, так и доменный переделы и позволяет достигать максимального общего эффекта по агло-доменному производству. Модель также может быть использована как советчик при управлении складами горно-обогатительного производства, в том числе закладки штабелей [48].

В ходе решения оптимизационной задачи учитываются основные особенности, свойственные ПАО «ММК». Во-первых, оптимизация привоза, складирования и потребления ЖРС выполняется по критерию минимума стоимости сырья при выполнении всех утвержденных на предприятии технологических и контрактных ограничений, ровности и химического состава штабелей, объема сырья на складах. Во-вторых, химический состав всех штабелей должен быть максимально близким друг к другу и стремиться к заданному оптимальному химическому составу, определяемому на основе статистического анализа данных и экспертных оценок специалистов горно-обогатительного производства и научно-технического центра ПАО «ММК».

Модель позволяет формировать следующие виды отчетов: оптимальная структура привоза и потребления ЖРС с учетом требуемого качества и производства агломерата и чугуна; оптимальный объем использования извести и известняка в агломерационном цехе, кварцита в доменном цехе; оптимальная структура склада ЖРС с учетом требуемого норматива и химического состава запасов; анализ чувствительности цен закупа ЖРС.

Использование модели оптимизации привоза и потребления ЖРС в ПАО «ММК» позволяет минимизировать влияние человеческого фактора при планировании закупки и потребления ЖРС. При этом одновременно учитываются требования и пожелания различных служб предприятия.

На основе двух моделей оптимизации привоза и потребления угольного и железорудного сырья разработана автоматизированная информационная система «Оптимальный чугун». Основная цель данной системы — определение таких технико-экономических параметров, которые позволяют максимизировать производство чугуна и минимизировать удельный расход кокса.

Подход предполагает разбиение исходной выборки на кластеры со схожими параметрами работы доменных печей и определение внутри этих кластеров основных технологических зависимостей. Модели привоза и потребления угольного и железорудного сырья используются для связи технологических параметров и эконмической составляющей. Результатом работы данной системы является вектор технологических и экономических параметров, который необходимо достичь для максимизации ожидаемого экономического эффекта, учитывающего, в том числе, и производство стали, стоимость лома и т.д.

Исходными данными для модели являются статистика работы доменных печей: дутьевой режим, шлаковый режим и температурный режим, а также результаты расчетов по моделям привоза и потребления сырья при различных исходных требованиях к качеству сырья и/или технологических параметров.

Для кластеризации исходной выборки используются нейронные сети (сети Кохонена), а для определения зависимостей параметров внутри кластеров используется метод наименьших квадратов. Оптимум определяется при решении задачи нелинейного программирования внутри кластера методом градиентного спуска.

Кластеризация данных проводилась с помощью анализа матрицы расстояний U-matrix нейронной сети обученной на данных статистики. На рисунке 1 представлена визуализация U-matrix. Чем ближе друг к другу располагаются нейроны в n-мерном пространстве, тем более темным синим цветом они обозначены. Можно определить, что темно-синим цветом обозначены нейроны, которые определяют регулярные данные, а красным — выбросы.

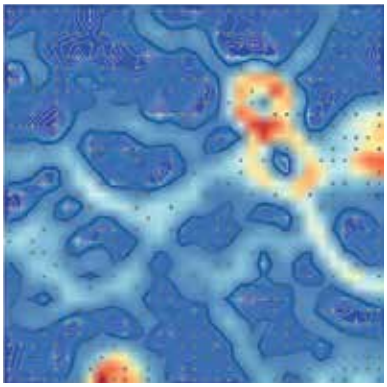


Рис. 1. U-matrix

Кластеризация производится путем выделения обособленных групп нейронов. Результат кластерного разбиения в виде карт работы доменной печи представлен на рисунке 2, где каждому кластеру соответствует свой цвет точек.

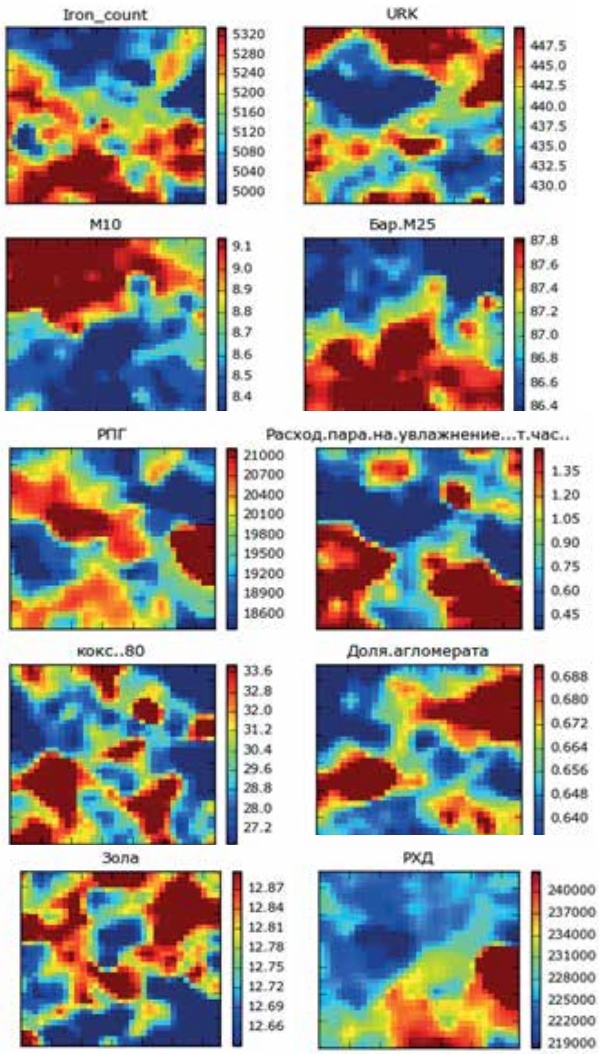


Рис. 2. Пример карт работы доменной печи

На рисунке 3 приведены примеры зависимостей производства чугуна и удельного расхода кокса от качества кокса по показателю М10, полученные после обучения нейронной сети.

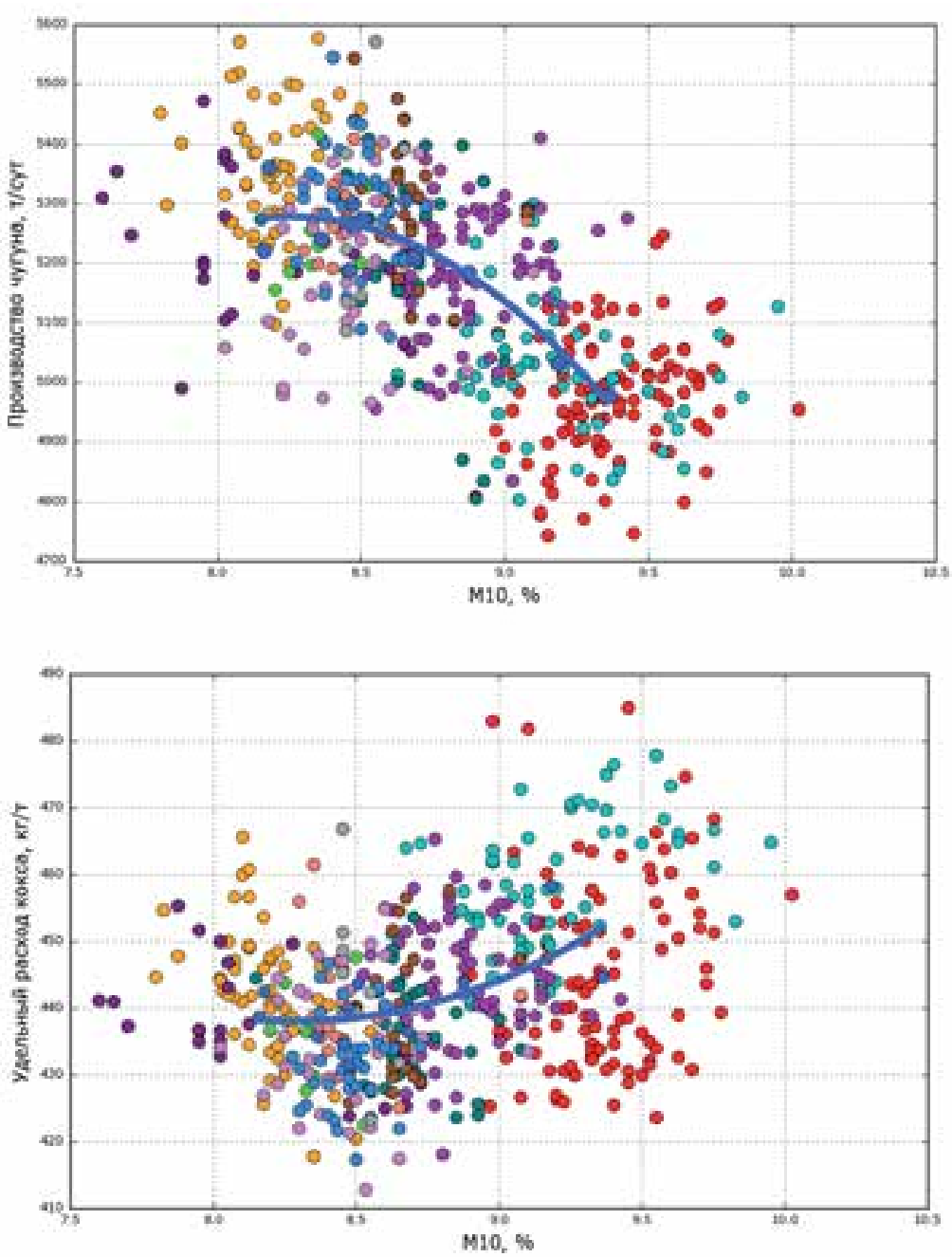


Рис. 3. Пример построенных зависимостей производительности и удельного расхода кокса

На основе решения задач кластеризации производится уточнение влияния управляющих параметров на основные параметры доменной плавки, такие как производительность и удельный расход кокса, в зависимости от режима работы печи. В таблице 1 в качестве примера представлены рассчитанные коэффициенты влияния показателя М10 на расход кокса и производительность доменной печи, в зависимости от ее режима работы (кластера), определяемого множеством других влияющих факторов.

Таблица 1. Коэффициенты влияния технологических параметров на производительность и удельный расход кокса для режимов работы ДП

Режим работы	Изменение производительности (т/сут) при увеличении М10 на 1%	Изменение удельного расхода кокса (кг/т) при увеличении М10 на 1%	Изменение производительности (%) при увеличении М10 на 1%	Изменение удельного расхода кокса (%) при увеличении М10 на 1%
1	-107,04	7,92	-2,13	1,82
2	-106,1	11,96	-2,10	2,63
3	-92,52	10,77	-1,77	2,49
4	-132,97	8,34	-2,58	1,90
5	-155,85	8,12	-3,05	1,96
6	-114,12	12,94	-2,20	3,06
7	-149,03	13,56	-2,86	3,28
8	-166,7	13,33	-3,29	3,20
9	-117,24	13,94	-2,23	3,23
Среднее	-126,84	11,21	-2,47	2,62

Разработанная модель реализована на основе клиент-серверной архитектуры и имеет web-интерфейс. Возможно осуществление расчетов по критериям минимума себестоимости стали, минимума себестоимости чугуна по максимуму производства чугуна. Пример интерфейса разработанной системы приведет на рис. 4.

Рис. 4. Модуль графического отражения факторных зависимостей с разбиением на кластеры по режимам работы ДП в АИС «Оптимальный чугун»

УРОВЕНЬ МОДЕЛЬНО-УПРЕЖДАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Существующая схема управления режимными параметрами доменного процесса направлена на удержание значений параметров в допустимых пределах, определенных технологической инструкцией и заданными техническими условиями. При данном виде управления значения режимных параметров колеблются случайным образом в рамках допустимых пределов. Как показали исследования, проведенные на доменной печи №10, размах колебаний зачастую превышает границы эффективной области значений режимных параметров. Это приводит к снижению производительности

печи и повышенному расходу кокса. Поэтому является актуальной задачей стабилизация колебаний режимных параметров в пределах эффективной области их значений с использованием современных методов модельно-упреждающего управления и интеллектуальных технологий.

Особенность современной методологии модельно-упреждающего управления 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. 5.

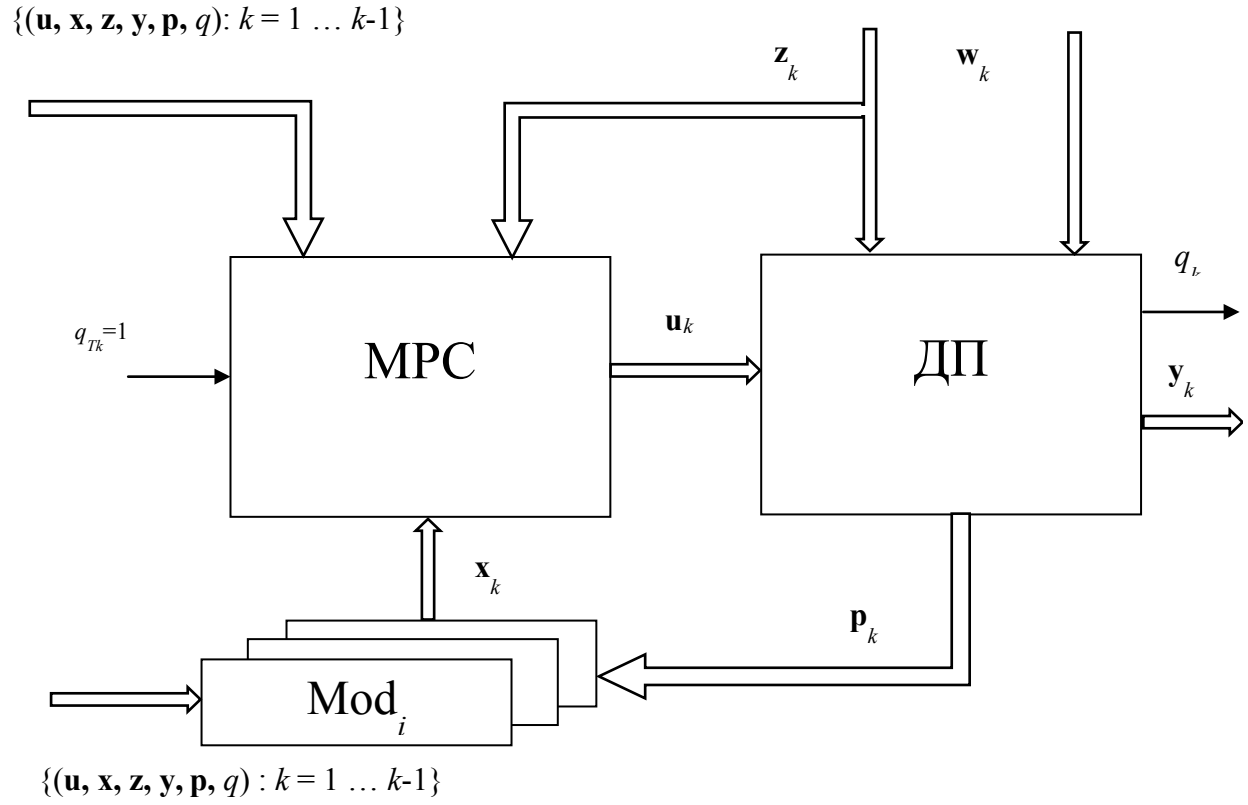


Рис. 5. Структура системы модельно-упреждающего управления доменным процессом

Здесь $\mathbf{u}_k$ — управляемые параметры доменного процесса (ДП); $\mathbf{z}_k$ — измеряемые неуправляемые параметры ДП; $\mathbf{w}_k$ — неизмеряемые возмущающие факторы ДП; $\mathbf{q}_k$ — 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 про-

цесса, которые обеспечивают оценку значений его вектора состояний; **MPC** — программа вычисления модельно-упреждающего управления; *k* — индекс текущей плавки.

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 [15].

Автоматизированная система оптимального модельно-упреждающего управления доменным процессом, предназначенная для работы в режиме советчика мастеру доменной печи, в настоящее время находится на стадии доработки и тестирования на реальных данных эксплуатации доменных печей ПАО «ММК».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный набор моделей позволяет оптимизировать бизнес-процесс технико-экономического управления агло-коксо-доменным производством, автоматизировав труд технологов, экономистов и специалистов по коммерции за счет определения оптимальных решений на стыке интересов различных служб, повышая максимальный экономический эффект для предприятия.

В настоящее время в рамках стратегической инициативы «ММК-Индустрия 4.0» продолжается развитие работ по оптимизации первого передела ПАО «ММК» на основе предложенного подхода с применением современных методов математического моделирования и интеллектуального анализа данных.

Список литературы

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. — С. 304.
12. 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.

13. 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.
14. 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.
15. В.М. Паршаков, А.А. Третяк, А.А. Полинов и др. Непрерывный автоматический контроль, количественная оценка и оптимизация параметров зоны плавления с помощью двумерной математической модели, учитывающей процессы по высоте и сечению печи от уровня засыпи до чугунной летки. Металлургия чугуна — вызовы XXI века. Труды VII Международного конгресса доменщиков. — М.: Издательский дом «Кодекс», 2017. С. 328–341.
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. D.A. Shnayder; L.S. Kazarinov; T.A. Barbasova; A.V. Lipatnikov Data mining and model-predictive approach for blast furnace thermal control // 2017 Intelligent Systems Conference (IntelliSys), 2017, P. 653–660 DOI: 10.1109/IntelliSys.2017.8324364
45. Степанова А.Е., Липатников А.В., Степанов Е.Н., Шнайдер Д.А. «Модель оптимизации привоза и потребления угольного сырья в ПАО «Магнитогорский Металлургический Комбинат». Материалы III Международной научной конференции. Ответственный редактор М.А. Тимофеева. 2017. С. 240–247.
46. Оптимизация потребления угольного сырья в ПАО «ММК» на основе математического моделирования / Липатников А.В., Шмелёва А.Е., Степанов Е.Н., Шнайдер Д.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 4. С. 30–38. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-30-38
47. Металлургия чугуна — вызовы XXI века. Труды VII Международного конгресса доменщиков. — М.: Издательский дом «Кодекс», 2017. С. 381–391.
48. Астратова Е.В., Липатников А.В., Шнайдер Д.А., Цыгалов М.А. Модель оптимизации привоза и потребления железорудного сырья в ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» В сборнике: Научно-технический прогресс в черной металлургии — 2017 Материалы III Международной научной конференции. Ответственный редактор М.А. Тимофеева. 2017. С. 15–22.

С.В. Филатов, А.И. Дагман, ПАО «НЛМК»

С.А. Загайнов, Л.Ю. Гилева, УрФУ

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ КОМПЛЕКСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМ ПРОЦЕССОМ

В настоящее время термины «цифровое производство» и «цифровые технологии» трактуются довольно широко. Изначально под это определение попадали системы автоматизированного проектирования. Потом в него стали включать системы управления технологическими процессами. На самом деле, стержнем концепции цифровой технологии является цифровая модель объекта или процесса и его существования в информационном пространстве. Цифровые технологии обеспечивают значительно более высокую культуру производства, создают возможности для удаленной совместной работы и кооперации участников проекта. Появляется возможность лучшего контроля хода технологических процессов и прогнозирования результатов работы каждого агрегата.

Необходимым условием при этом является создание на промышленном предприятии единого информационного пространства, с помощью которого все автоматизированные системы управления предприятием, а также промышленное оборудование могут оперативно и своевременно обмениваться информацией.

На ПАО «НЛМК» разработана и постоянно совершенствуется цифровая модель информационной среды доменного производства. Идеология совершенствования информационной системы ориентирована на создание базы данных, которая позволяет решать комплекс задач как оперативного анализа работы печей, так и комплекс задач прогноза режимов работы печей, при необходимости реализовать гибкие технологии.

Общий подход к решению конкретных технологических задач сводится к построению математических моделей, которые должны учитывать развитие основных физико-химических процессов, протекающих в печи.

Задача построения и реализации всеобъемлющей модели доменного процесса не ставится. Для реализации модели в полном объеме требуется знание большого количества переменных, многие из которых могут быть получены только в результате сложных лабораторных экспериментов и конкретны для каждого вида сырья и каждой доменной печи.

Принимая во внимание, что задачи моделирования всегда носят конкретный характер, необходимость учета и детализации взаимосвязей процессов доменной плавки определяется решаемой технологической задачей и накладываемыми ею ограничениями на величину изменения режимных параметров.

Общий подход к задачам моделирования доменного процесса предусматривает необходимость использования системного подхода с декомпозицией модели на основе современных представлений об основных физико-химических процессах доменной плавки с учетом конкретной задачи моделирования и наличия информации для решения этой задачи (рисунок 1) [1,2]. Степень учета взаимосвязи между развитием тех или иных процессов доменной плавки конкретно выбирается в зависимости от технологической задачи.

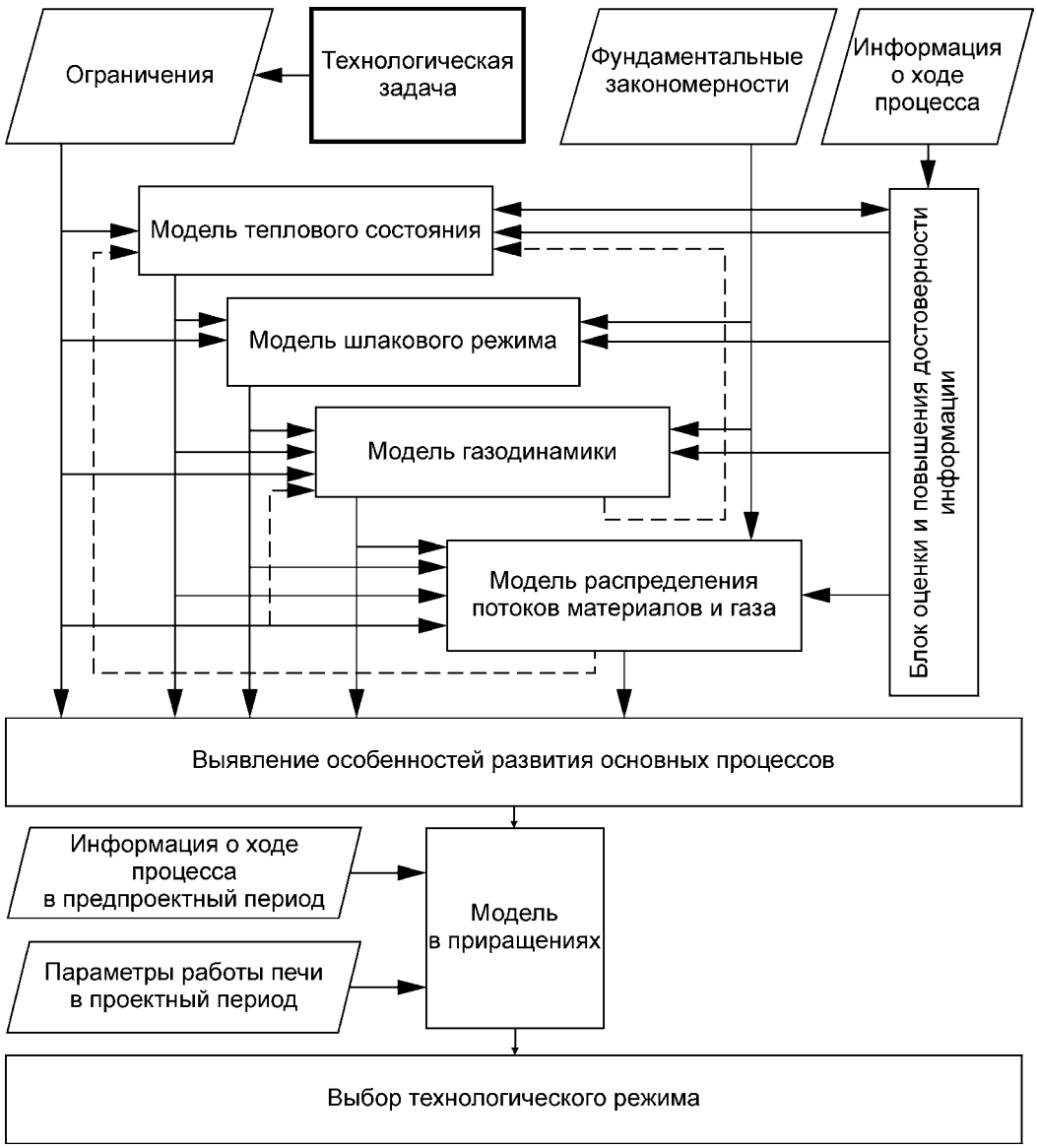


Рис. 1. Схема моделирования доменного процесса при решении комплекса технологических задач

В основу каждой модели положены фундаментальные закономерности доменного процесса и полученные при анализе работы печей эмпирические соотношения. Каждый из блоков модели представлен совокупностью отдельных элементов, реализующих уравнения, описывающие развитие основных процессов доменной плавки, и массивом нормативно-справочной информации. Формирование массива нормативно-справочной информации осуществляется как на основе моделирования закономерностей тепло- и массообмена, так и статистического анализа характерных периодов работы доменных печей.

Моделирование показателей процесса при изменении его параметров основано на идеологии натурно-модельного подхода [3, 4, 5]. При этом оценивается приращение выходной переменной при изменении какой-либо входной величины относительно значений в текущий (предпроектный) период работы печи. Исходные уравнения модели в приращениях дифференцируются в частных производных по каждой из изменяемых координат. В общем случае уравнение для оценки проектных значений выходных переменных можно представить в следующем виде:

$$Y_j^* = \overline{Y_j} + \sum \frac{\partial Y_j}{\partial X_i}\left(X_i^* + \prod_{X_i^*} - \left(\overline{X_i} + \prod_{\overline{X_i}}\right)\right) + \sum \frac{\partial Y_j}{\partial Z_k}\left(Z_k^* - \overline{Z_k}\right) + \prod_{\overline{Y_j}} - \prod_{Y_j^*} \qquad (1)$$

Здесь Y_j^* и $\overline{Y_j}$ – значения *j*-го выходного параметра в проектный и текущий периоды; X_i^* и $\overline{X_i}$ – значения *i*-го входного параметра в проектный и текущий периоды; Z_k^* и $\overline{Z_k}$ – значение *k*-ого возмущения в проектный и текущий периоды; Π – помехи (в частном случае погрешности измерения параметров и показателей процесса).

При определении прогнозных значений выходных переменных по уравнению (1) в расчетной схеме учитываются только те входные переменные, которые меняются в конкретной задаче моделирования. За счет этого сокращается число переменных, учитываемых при нахождении прогнозных оценок. При этом погрешность моделирования зависит только от изменения помех варьируемых переменных и не зависит от помех параметров постоянных в конкретной задаче.

Если принять, что ошибки измерения переменных постоянны во времени, то погрешность расчета $\left(\delta_{Y_j^*}\right)$ при использовании такого подхода составит:

$$\delta_{Y_j^*} = \Delta\prod_{Y_j} + \sum \frac{\partial Y_j}{\partial X_i}\Delta\prod_{X_i} .$$

Использование натурно-модельного подхода в существенной мере позволяет повысить надежность получаемых оценок. Однако, учитывая нелинейность доменного процесса, использование линеаризованных зависимостей возможно только в ограниченном диапазоне изменения входных параметров. С использованием методов дифференциальной геометрии определены такие диапазоны изменения режимных параметров, при которых погрешность моделирования не превышает 5% (отн.) [6]. Такой подход позволяет реализовать принцип помехозащищенности за счет выбора структуры вычислений, в которой наименее достоверные данные используются таким образом, чтобы ошибки, вызванные этими данными, не приводили к существенным погрешностям результатов моделирования [7].

Модель используется для решения широкого круга технологических задач [8, 9]. Конструирование модели для решения конкретной задачи реализуется в два этапа. На первом этапе моделируются все физико-химические процессы. Это позволяет выявить доминирующие факторы, ограничения и допустимые диапазоны варьирования режимных параметров и выбрать конкретную структуру модели (второй этап), что дает возможность существенно упростить модель без потери точности решения поставленной задачи.

В рамках сформулированного подхода реализованы модели для решения следующих задач:

— выбор способа снижения перепада давления в конкретной ситуации;

— оценка рисков, связанных с изменением качества шихтовых материалов при вдувании ПУТ;

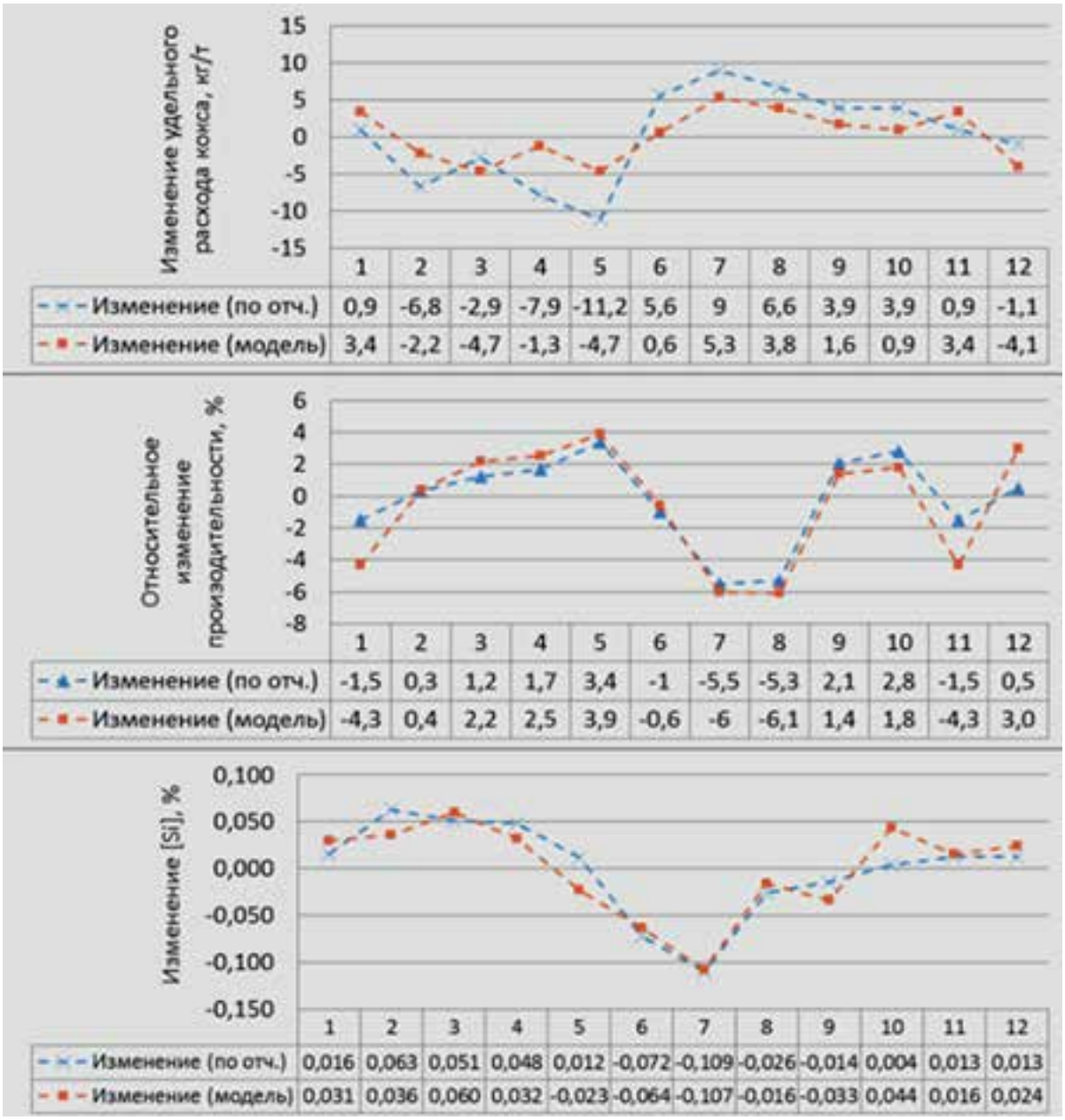
— выбор программы управления при необходимости корректировки теплового состояния или при замене одного из видов топлива;
— определение пересчетных коэффициентов при конкретных условиях работы доменных печей.

Применительно к решению актуальной задачи снижения затрат тепла на выплавку чугуна и повышению требований к содержанию примесных элементов совместно с ЛГТУ построена модель, позволяющая оценивать зависимость удельных затрат углерода, производства, состава продуктов плавки при заданных сырьевых условиях и параметрах доменной плавки (рисунок 2).

Рис. 2. Структура решения задачи моделирования

Адекватность модели проверена путем сопоставления расчетных и фактических изменений содержания кремния в чугуне, производительности печи и удельного расхода кокса в характерные периоды работы доменных печей. Пример проверки адекватности модели приведен на рисунке 3.

Модель включена в систему оптимизации технологической схемы производства чугуна на ПАО «НЛМК».



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Изменение (по отч.)	0,9	-6,8	-2,9	-7,9	-11,2	5,6	9	6,6	3,9	3,9	0,9	-1,1
Изменение (модель)	3,4	-2,2	-4,7	-1,3	-4,7	0,6	5,3	3,8	1,6	0,9	3,4	-4,1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Изменение (по отч.)	-1,5	0,3	1,2	1,7	3,4	-1	-5,5	-5,3	2,1	2,8	-1,5	0,5
Изменение (модель)	-4,3	0,4	2,2	2,5	3,9	-0,6	-6	-6,1	1,4	1,8	-4,3	3,0

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Изменение (по отч.)	0,016	0,063	0,051	0,048	0,012	-0,072	-0,109	-0,026	-0,014	0,004	0,013	0,013
Изменение (модель)	0,031	0,036	0,060	0,032	-0,023	-0,064	-0,107	-0,016	-0,033	0,044	0,016	0,024

Рис. 3. Результаты моделирования показателей доменной плавки

Список литературы

1. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спирин [и др.], под ред. Н.А. Спирина — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. — 617 с.
2. Теплотехника доменного процесса / Китаев Б.И. [и др.] — М: Металлургия, 1978. — 248 с.
3. Авдеев В.П., Карташев В.Я., Мышляев Л.П. Восстановительно-прогнозирующие системы управления. — Кемерово: КГУ, 1984. — 90 с.
4. Авдеев В.П., Даниелян Т.М., Белоусов П.Г. Идентификация промышленных объектов с учетом нестационарных и обратных связей. — Новокузнецк: СМИ, 1984.

5. Суханов Е.Л. Применение адаптивных моделей для управления доменным процессом / Суханов Е.Л., Загайнов С.А. // Оценка методов адаптивного управления, используемых в прикладных задачах: Тезисы докладов. — М: ИПУ, 1989.
6. Гилева Л.Ю. Анализ нелинейности характеристик доменного процесса / Гилева Л.Ю., Загайнов С.А., Ярошенко Ю.Г. // Известия Вузов. Черная металлургия, № 8, 1994. — С. 66–68.
7. Гилева Л.Ю. Разработка математической модели с переменной структурой для анализа и прогноза показателей работы доменной печи на основе отчетных данных / Гилева Л.Ю., Ярошенко Ю.Г., Загайнов С.А. // Известия Вузов, Черная металлургия, № 4, 1993.
8. Суханов Е.Л. Определение методом моделирования показателей доменного процесса при изменении условий плавки / Суханов Е.Л., Загайнов С.А., Раев О.Ю. // Известия Вузов. Черная металлургия, № 8 1989.
9. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / Н.А. Спирин [и др.], под ред. Н.А. Спирина — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. — 301 с.
10. Spirin N.A., Ipatov Y.V., Lobanov V.N., Krasnobaev V.I., Lavrov V.V., Ryibolovlev V.Y., Shvyidkiy V.S., Zagaynov S.A., Onorin O.P. Informatsionnyie sistemyi v metallurgii [Information systems in metallurgy]. Ekaterinburg: USTU – UPI, 2001, 617 p.
11. Kitaev B.I., Yaroshenko Y.G., Suhanov E.L., Ovchinnikov Y.N., Shvyidkiy V.S. Teplotehnika domennogo protsessa [Heat engineering of blast furnace process]. Moscow: Metallurgy, 1978, 248 p
12. . Avdeev V.P., Kartashev V.Y., Myishlyaev L.P. Vosstanovitelno-prognoziruyuschie sistemyi upravleniya [Restorative-predictive control systems]. Kemerovo: KGU, 1984, 90 p.
13. Avdeev V.P., Danielyan T.M., Belousov P.G. Identifikatsiya promyishlennyih ob'ektov s uche-tom nestatsionarnyih i obratnyih svyazey [Identification of industrial facilities taking into account non-stationary and feedback]. Novokuznetsk: SMI, 1984 p.
14. Suhanov E.L., Zagaynov S.A. Primenenie adaptivnyih modeley dlya upravleniya domennyim protsessom [Application of adaptive models for managing the blast-furnace process]. Moscow: IPY, 1989.
15. Gileva L.Y., Zagaynov S.A., Yaroshenko Y.G. Analysis of the nonlinearity of the characteristics of the blast-furnace process. Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Chyornaya metallurgiya [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 1994, no. 8, pp. 66–68.
16. Gileva L.Y., Yaroshenko Y.G., Zagaynov S.A. Development of a mathematical model with a variable structure for analysis and forecasting the performance of a blast furnace based on reporting data. Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Chyornaya metallurgiya [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 1993, no. 4.
17. Suhanov E.L., Zagaynov S.A., Raev O.Y. Determination by the modeling method of the indices of the blast-furnace process when the melting conditions change. Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Chyornaya metallurgiya [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 1989, no. 8.
18. Onorin O.P., Spirin N.A., Terentev V.L. and colleagues. Komp'yuternye metody modelirovaniya domennogo processa [Computer modeling methods of the blast-furnace process]. Ekaterinburg: USTU – UPI, 2005, 301 p.

Раздел V
ПРОДУКЦИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПАНИЙ ДЛЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Йенс Ланге, GEA Bischoff
А.Ю. Глазер, GEA Россия
ЭФФЕКТИВНАЯ ГАЗООЧИСТКА С РУКАВНЫМИ ФИЛЬТРАМИ GAE ECOPULS 234

Л.А. Зайнуллин, В.Г. Грезнев, Д.В. Мехряков, ОАО «ВНИИМТ»
УСТАНОВКИ ПРИПЕЧНОЙ ГРАНУЛЯЦИИ ШЛАКА..... 240

Л.А. Зайнуллин, А.Ю. Епишин, ОАО «ВНИИМТ»
С.В. Филатов, ПАО «НЛМК»
ОХЛАЖДЕНИЕ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ МЕДНЫМИ ХОЛОДИЛЬНИКАМИ 247

Йенс Ланге, GEA Bischoff
Александр Глазер, GEA Россия

ЭФФЕКТИВНАЯ ГАЗООЧИСТКА С РУКАВНЫМИ ФИЛЬТРАМИ GEA ECOPULS

Технология GEA ECOpuls значительно снижает уровень выбросов и при этом характеризуется простотой обслуживания, небольшим перепадом давления и сверхнизким потреблением энергии. Залогом этого является постоянно совершенствуемый низконапорный рукавный фильтр GEA с вращающейся системой регенерации.

Технология ECOpuls с продувочным коллектором с приводом используется по всему миру в разных отраслях промышленности, в том числе на предприятиях черной металлургии в системах аспирации. Эта хорошо зарекомендовавшая себя технология позволяет достигнуть содержания пыли в очищенном газе менее 5 мг/нм^3. Соответственно, прочно и обоснованно устоялся термин «система с нулевыми выбросами». Рукавные фильтры получили признание в качестве передовой технологии десятки лет тому назад. Существующие на тот момент времени электростатические фильтры были впоследствии переделаны в рукавные фильтры. Благодаря своей компактной конструкции технология ECOpuls отлично подходит для такой переделки. Она также позволяет использовать существующий корпус фильтра, что позволяет наполовину снизить расходы на переделку. Гибкость фильтрационной системы GEA ECOpuls проиллюстрирована ниже с помощью двух примеров (новый фильтр/конвертация электрофильтра).

Рукавный фильтр ECOpuls (рисунок 1) характеризуется небольшим перепадом давления, высокой эффективностью фильтрации и низкими эксплуатационными расходами. Рукавный фильтр GEA ECOpuls может быть представлен в однопоточной (рисунок 2) или двухпоточной (рисунок 3) конфигурации в зависимости от доступного пространства. Эти два типа отличаются друг от друга маршрутом движения газа. В однопоточной конфигурации канал для неочищенного газа и канал для очищенного газа устанавливаются по бокам. При двухпоточной компоновке канал для неочищенного газа/очищенного газа расположен в центре.

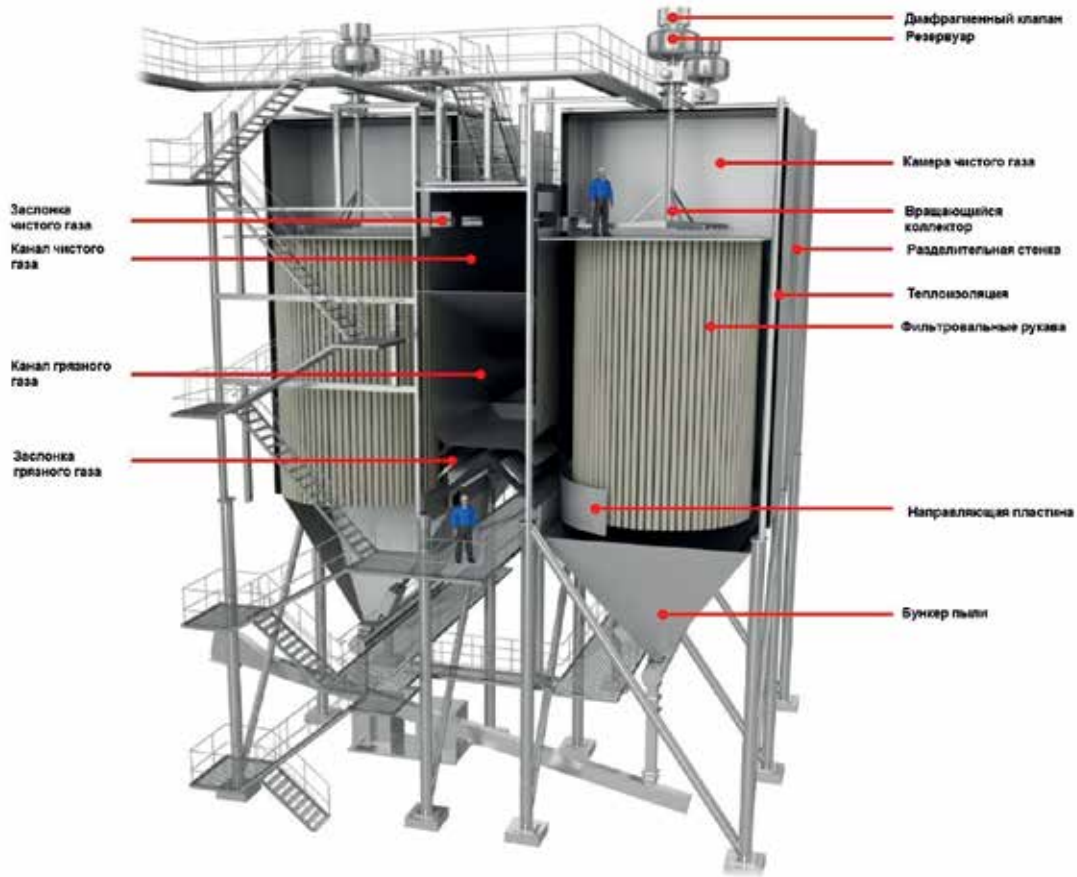


Рис. 1. Рукавный фильтр GEA ECOpuls

Рис. 2. Однопоточный фильтр GEA ECOpuls

Рис. 3. Двухпоточный фильтр GEA ECOpuls

Фильтр ECOpuls разделен на отдельные камеры (каждая из которых имеет зону неочищенного газа и зону очищенного газа), которые можно изолировать с помощью заслонок. Такая конструкция позволяет изолировать отдельные камеры от потока газа (например, на время технического обслуживания без остановки технологического процесса). Как рукавная плита, так и зона очищенного газа могут быть изготовлены из нержавеющей стали, так как эти места особенно подвержены коррозии. В каждой камере устанавливается до 1200 фильтровальных рукавов. Рукава длиной до 10 м имеют овальную форму и расположены по концентрическим окружностям. Размеры фильтровальных рукавов позволяют использовать максимальную площадь фильтрующей поверхности на единицу объема фильтра.

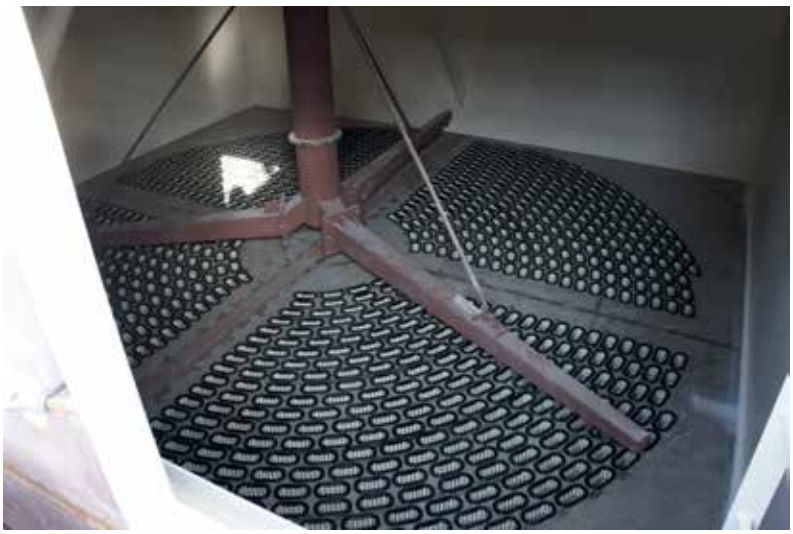


Рис. 4. Камера очищенного газа с продувочным коллектором низкого давления

Фильтровальные рукава эффективно регенерируются при 0,8 бара с помощью продувочного коллектора (рисунок 4). Преимущество данной конструкции заключается в том, что для каждой камеры требуется только один очистной клапан (то есть один клапан для 1200 рукавов). Благодаря вращению системы регенерации, регенерация носит систематический, но при этом случайный характер, и, следовательно, представляет собой стохастический процесс. Это значит, что в течение длительного периода времени все рукава очищаются с одинаковой периодичностью. Необходимый сжатый воздух производится доступными на рынке воздуходувками типа Roots. Ко всем деталям, таким как импульсные мембраны и приводные элементы, имеется доступ извне, при этом они установлены на крыше рукавного фильтра, что значительно упрощает проведение работ по техническому обслуживанию.

В зону очищенного газа можно без затруднений войти через боковые двери, что создает удобство технического обслуживания. В отличие от традиционных типов фильтров, отсутствует необходимость в трудоемком демонтаже крышек/изоляции и продувочных труб. С одной стороны, уменьшается до минимума поверхность герметизации, и воздух, подсасываемый через неплотности, как и возникающая при этом коррозия, больше не являются проблемой. И, с другой стороны, замена рукавов занимает всего 60% времени, которое бы потребовалось в случае обычного фильтра. Кроме того, конструкция камеры чистого газа выполнена таким образом, чтобы была возможность легко снять и установить разъемные каркасы рукавов без применения инструментов и создать минимальное сопротивление потоку.

В каждой камере могут быть установлены детекторы порванных рукавов, повышающие эксплуатационную надежность и обеспечивающие быстрое обнаружение поврежденных рукавов. Регенерация осуществляется с помощью мембранных/электромагнитных клапанов через резервуар сжатого воздуха, установленный для каждой камеры, создается низконапорный выброс воздуха 0,8 бара (рисунок 5). Содержимое резервуара (емкостью до 1,5 м^3) подается в рукава через непрерывно вращающийся продувочный коллектор. Такие системы, как правило, состоят из трех продувочных коллекторов, ниже ко-

торых на стороне выпуска установлены щелевые сопла. Поток продувочного газа на фильтровальный рукав приблизительно в четыре раза сильнее, чем в традиционных фильтрах высокого давления.

Рис. 5. Резервуар сжатого воздуха со встроенными мембранными клапанами

Рукава эффективно продуваются по всей длине. Данная операция выполняется в процессе работы без прерывания фильтрации. Этот вариант используется на фильтрах с рукавами длиной до 10 м, направляет энергию фильтрации непосредственно на рукава, делая неактуальными системы высокого давления, работающие в режиме off-line. Импульс давления накладывается более мягко, обеспечивает длительный срок службы фильтровального рукава и сокращает расходы на эксплуатацию фильтра.

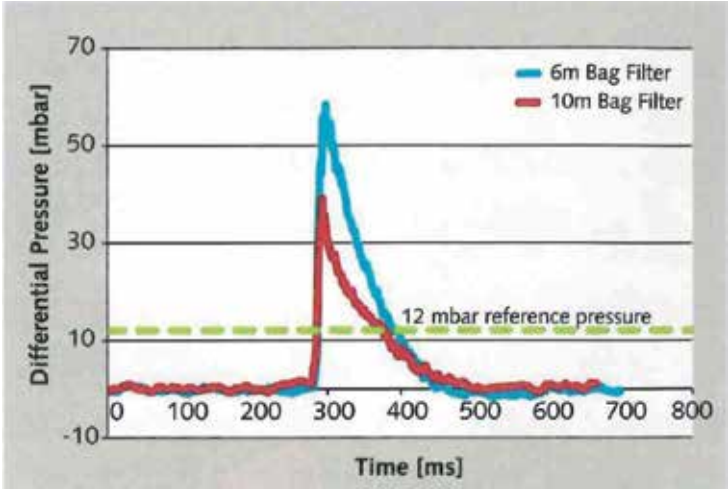


Рис. 6. График давления на конце фильтровального рукава

Высокий перепад давления на фильтровальном рукаве, достигаемый с помощью этого процесса (рисунок 6), используется с небольшими потерями для очистки. При данной системе отпадает необходимость в сложной подготовке сжатого воздуха, включая осушку, и прочих деталях для редуцирования давления, которые необходимы в высоконапорных системах. Еще одно преимущество низконапорной технологии заключается в использовании повышения температуры до примерно 80°C при сжатии. Благодаря этому, во время продувки полностью исключается понижение температуры ниже точки росы.

УСТАНОВКА НОВОГО ФИЛЬТРА GEA ECOPULS

В рамках многих проектов команда GEA сталкивается с такими ограничениями, как небольшая площадь, жесткий график и высокие стандарты промышленной безопасности. Заказ, недавно выполненный на немецком заводе, предусматривал установку рукавного фильтра ECOpuls, новой дымовой трубы, дымососов, автоматической системы нанесения предварительного покрытия и соединительных трубопроводов.

Использование максимально возможных размеров элементов (например, боковых стенок, поставляемых и устанавливаемых одним блоком) и модульной конструкции означает, что многие детали могут быть предварительно собраны на уровне земли, а затем установлены как один большой блок. Это сводит к минимуму сложную работу на больших высотах.

Рис. 7. Монтаж газохода

Монтаж здесь занял около четырех месяцев, а переподключение было завершено в течение трех недель. Такая операция по повторному соединению заключалась в установке и теплоизоляции новых газоходов грязного газа, а также установке опор подъемного крана. Особенно трудной задачей оказалась установка «гусака» (3,4 м в диаметре и длиной около 25 м, см. рисунок 7), соединяющего выход башни кондиционирования с входом рукавного фильтра.

Все сроки были соблюдены, и ввод в эксплуатацию был завершен без каких-либо проблем.

КОНВЕРТАЦИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА В РУКАВНЫЙ ФИЛЬТР

На протяжении десятилетий конвертация электрофильтров в рукавные фильтры является передовой технологией. В таких случаях имеющийся корпус фильтра продолжает использоваться. В модификации нуждается лишь крыша корпуса фильтра, чтобы была возможность поместить пакет рукавов в комплексе с камерой очищенного газа, с одной стороны, и новый канал для очищенного газа, с другой стороны. Данная процедура позволяет сэкономить около 50% затрат по сравнению с установкой целого нового фильтра. Однако в рамках такого проекта по переделке требуется в два раза

больше времени на переподключение (от 4 до 6 недель). При этом предварительная сборка камеры очищенного газа на уровне земли позволяет до минимума сократить это время. В данном случае новая камера очищенного газ в комплексе с рукавной плитой собирается на уровне земли (рисунок 8) и поднимается краном на имеющийся корпус фильтра (рисунок 9) для установки. Оптимальная конструкция и минимальное количество соединений предопределили использование фильтра ECOpuls для переделки электростатических фильтров без необходимости внесения каких-либо радикальных изменений в имеющуюся конструкцию.

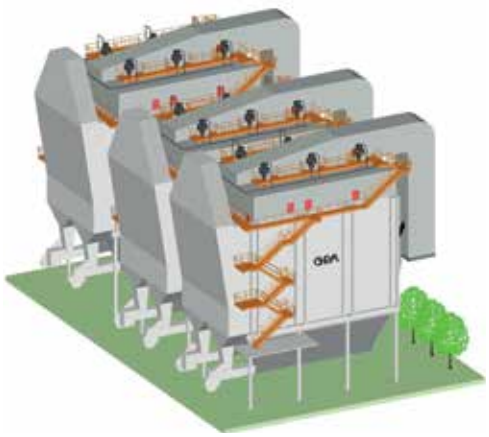
Рис. 8. Сборка камеры чистого газа

Рис. 9. Установка камеры чистого газа

Рукавный фильтр GEA ECOpuls, соответствующий всем заявленным характеристикам, в сочетании со сверхнизкими эксплуатационными расходами и показателями по очищенному газу, близкими к пределу обнаружения, характеризуется соответствием самым высоким промышленным стандартам. Его инновационный дизайн упрощает техническое обслуживание, тем самым обособляя эту систему от более сложных высоконапорных систем.

Благодаря более чем 100-летнему опыту и огромному количеству завершенных проектов, GEA является надежным партнером по всему миру для сектора промышленной очистки газов и защиты окружающей среды в целом.

Компактная конструкция рукавного фильтра ECOpuls позволяет использовать его либо в стесненных условиях в однопоточной конфигурации или компактной двухпоточной конфигурации, либо для переделки существующих электростатических фильтров.



Л.А. Зайнуллин, В.Г. Грезнев, Д.В. Мехряков, ОАО «ВНИИМТ»

УСТАНОВКИ ПРИПЕЧНОЙ ГРАНУЛЯЦИИ

1. ТЕХНОЛОГИЯ ПРИПЕЧНОЙ ГРАНУЛЯЦИИ

Специалисты ОАО «ВНИИМТ» разработали и успешно внедрили технологию припечной грануляции доменного шлака, позволяющую:

— получать гранулированный шлак заданной структуры и фракционного состава для эффективного его использования, в первую очередь, как гидравлически активной добавки к цементу. При этом необходимых характеристик можно достичь водной грануляцией исходного расплава с возможно большей начальной температурой перед грануляцией;
— обеспечить взрывобезопасность процесса грануляции за счет диспергирования расплава над бассейном, а не в гидрожелобах;
— достичь максимально возможного снижения влажности гранулированного шлака откачкой граншлака при помощи эрлифта из бассейна в обезвоживатель специальной конструкции;
— создать экологически комфортные условия в районе литейного двора доменной печи, максимально локализовав парогазовые выбросы, с удалением их через вытяжную трубу;
— утилизировать тепло исходного расплава за счет конденсации пара, образующегося при грануляции, например, при выпарке с использованием вакуумных выпарных аппаратов загрязненных стоков;
— внедрить припечные установки грануляции в стесненных условиях доменных цехов за счет компактности и моноблочности установок.

2. ТЕХНОЛОГИЯ ГРАНУЛЯЦИИ ШЛАКА

Изложенная ниже технология припечной грануляции доменного шлака разработана ОАО «ВНИИМТ» и защищена патентами РФ. Один из вариантов представлен на рисунке 1.

Жидкий шлак из доменной печи по желобу 2 поступает к узлу грануляции (гидромонитору) 3, где за счет механического воздействия струй воды раздрабливается и в виде трехфазной смеси поступает в приемный бункер 5, заполненный водой. Приемный бункер оборудован металлической решеткой 4, задерживающей негабаритные предметы. При погружении в воду частицы шлака охлаждаются и затвердевают. Образующийся в процессе грануляции пар через вытяжную трубу 1 выбрасывается в атмосферу.

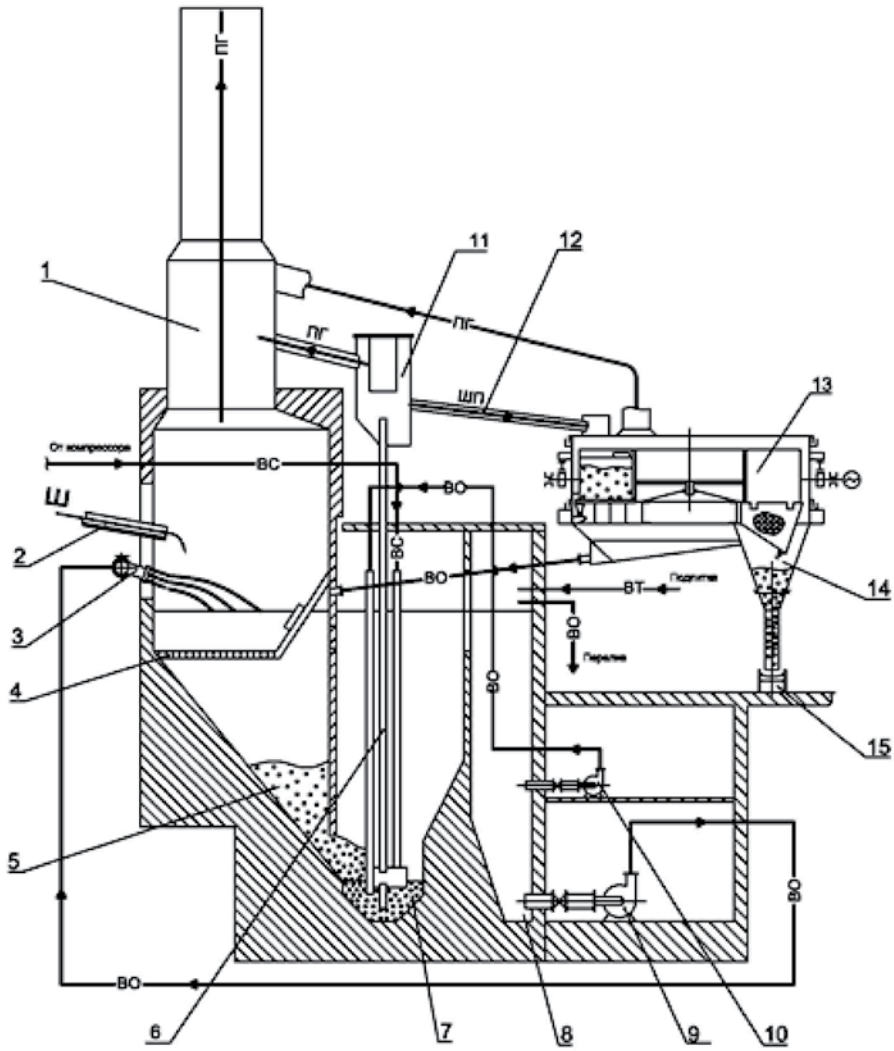


Рис. 1. Схема установки припечной грануляции доменного шлака

1 — вытяжная труба, 2 — желоб шлаковый, 3 — гидромонитор, 4 — решетка, 5 — приемный отсек гранбассейна, 6 — эрлифт шлаковый, 7 — отсек эрлифтный, 8 — отсек осветленной воды, 9 — насос грануляционной воды, 10 — насос взмучивающей воды, 11 — сепаратор эрлифта, 12 — пульпопровод в обезвоживатель, 13 — обезвоживатель карусельный, 14 — бункер гранулированного шлака, 15 — конвейер обезвоженного шлака

Гранулированный шлак вместе с водой через проем в вертикальной стенке поступает в эрлифтный отсек 7. Поднимаясь по колодцу эрлифта, вода осветляется и переливается в камеру осветленной воды 8,

откуда забирается насосом 9 и подается к гидромонитору на очередной цикл грануляции. В случае завала проема гранулированным шлаком вода поступает в колодец эрлифта через верхнее переливное устройство, снабженное опускной трубой. Гранулированный шлак транспортируется шлаковым эрлифтом 6 — вертикальной трубой, футерованной каменным литьем. Применение эрлифта для перекачки шлака вызвано тем, что эрлифт более надежен, износостоек, обеспечивает перекачку густой пульпы (Т:Ж — 1:2) с большей эффективностью по сравнению с насосами для перекачки горячей пульпы.

Для взмучивания гранулированного шлака на всосе эрлифта предусмотрен подвод воды от отдельного насоса 10, забирающего воду из камеры осветленной воды. Под действием вводимого в насадку эрлифта сжатого воздуха смесь воды с гранулированным шлаком поднимается в сепаратор 11, откуда самотеком по пульпопроводу 12 поступает в обезвоживатель 13 карусельного типа — вращающуюся сварную конструкцию цилиндрической формы, разделенную на сегменты и снабженную стационарной крышкой и поддоном. Через крышку подается шлаковая пульпа от сепаратора эрлифта, а также эвакуируется паровоздушная смесь в вытяжную трубу. Поддон обеспечивает сбор фильтрующейся воды и ее возвращение в приемный бункер. Обезвоженный граншлак из бункера 14 выгружается на ленточный конвейер 15 и передается на склад. Рекомендуемый способ складирования гранулированного шлака — открытый склад штабельного типа. Влажность шлака в штабеле увеличивается по направлению к основанию штабеля. Рациональная организация работ по перевалке и отгрузке шлака позволит дополнительно снизить влажность шлака.

Установки припечной грануляции шлака по технологии ОАО «ВНИИМТ» внедрены на следующих предприятиях:

— «Криворожсталь» (ДП-9, V=5000 м^3, четыре установки, 1975 г.);
— НЛМК (ДП-6, V=3200 м^3, четыре установки, 1978 г.);
— «Северсталь» (ДП-5, V=5580 м^3, четыре установки, 1986 г.);
— Бхилайский МК (ДП-7, V=3000 м^3, четыре установки, 1989 г.);
— ЗФ ГМК «Норильский никель» (электропечи обеднения шлака, четыре установки, 1998–2005 гг.);
— АО «Тяньцзинская металлургическая группа», Китай, (ДП-1, ДП-2, V=1260 м^3, четыре установки, 2012 г.);
— Баотоуский МК, Китай, (ДП-1, ДП-2 V=4150 м^3 четыре установки, 2014 г.).

Грануляция доменного шлака на Баотоуском МК

В 2014 г. на предприятии введен в эксплуатацию комплекс из двух доменных печей объемом по 4150 м^3, для каждой из которых предусмотрены две автономные установки припечной грануляции шлака (УПГШ) по технологии ОАО «ВНИИМТ». Специалисты ОАО «ВНИИМТ» разработали базисный проект на комплекс припечной грануляции шлака, задание на выполнение рабочего инжиниринга, технический проект обезвоживателя карусельного типа. По дополнительному контракту было изготовлено и поставлено эрлифтное оборудование. На основное оборудование установок грануляции ОАО «ВНИИМТ» разработал технические проекты для дальнейшего рабочего проектирования и изготовления в КНР.

Каждая доменная печь, оборудованная четырьмя шлаковыми летками, оснащается двумя УПГШ с противоположных сторон печи. В составе каждой установки предусматривается одна технологическая линия (без резервной). Шлак выпускается каждые два часа через две из четырех леток попеременно. На каждую УПГШ жидкий шлак подается через каждые 4 ч. Интенсивность эксплуатации оборудования в данном случае вдвое выше, чем на УПГШ доменных печей в России.

При расчетном режиме установка работает 99 мин и 141 мин находится в режиме ожидания. При выходе одной из двух установок на ремонт шлак выпускают из доменной печи на одну сторону, режим работы действующей установки не меняется, а продолжительность ожидания сокращается до 21 мин. Такое решение позволяет вести грануляцию шлака в достаточно широком диапазоне технологических режимов без ухудшения качества обезвоженного граншлака.

Основное оборудование УПГШ размещается в здании площадью 27×33 м^2. Высотная отметка здания по нижнему поясу ферм +25,0 м. В здании установлен мостовой опорный кран грузоподъемностью

10 т, размещаются карусельный обезвоживатель, шлаковый эрлифт, насосная станция, помещение поста управления, а также колодец эрлифта и камера осветленной воды. Приемный бункер, гидромониторы и система пароудаления, включающая укрытие бункера и вытяжную трубу, размещаются в пристроенном помещении между основным зданием и рабочей площадкой литейного двора доменного цеха. Общий вид установки представлен на рисунках 2, 3.

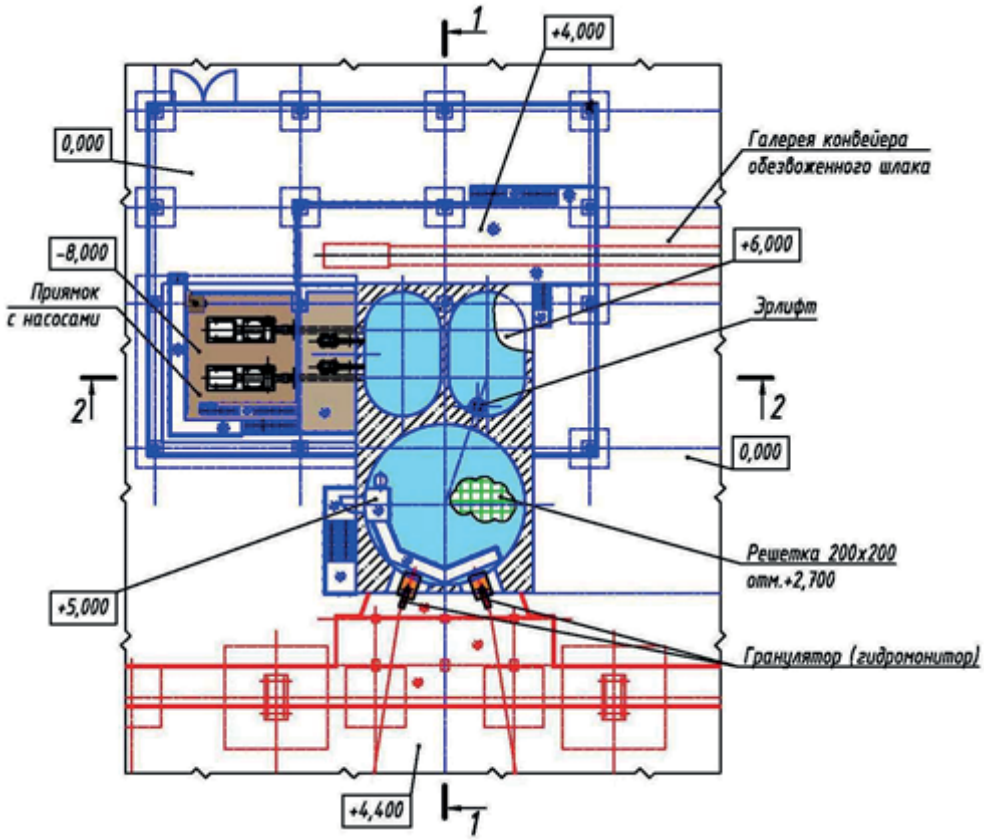


Рис. 2. План установки грануляции в Баотоу

Установки грануляции работают в автоматическом режиме. Вся информация от первичных датчиков приходит на контроллер, который связан с панелью оператора, где отображаются на мнемосхеме параметры подводимых энергоносителей в процессе грануляции шлака и работа установки. Контроллер вырабатывает предупредительные и аварийные сигналы при отклонении параметров энергоносителей ниже заданного значения. Приборы видеонаблюдения позволяют контролировать процесс грануляции с рабочего места оператора.

По согласованию заинтересованных сторон в июне 2014 г. бригада специалистов ОАО «ВНИИМТ» выехала на площадку в Баотоу. В ходе осмотра выявлены отступления от базисного проекта, допущенные китайской стороной, и нарушения, связанные непосредственно с технологией грануляции шлака:

- работа с увеличенной производительностью по шлаку (отличие от исходных данных по контракту более чем на 30%);
- отступления от требований инструкции по эксплуатации шлаковых эрлифтов;
- неоптимальная схема регулирования сжатого воздуха, подаваемого на эрлифтное оборудование;
- отличие конструктивных размеров отдельных элементов гидромонитора от заданных, указанных в базовом проекте;
- неоптимальный выбор насосного оборудования и параметров тракта грануляционной воды, сложность регулирования расхода и достижения необходимого давления воды на гидромониторе;

— отличие формы приемного отсека гранбассейна от рекомендованной ОАО «ВНИИМТ», в связи с чем затруднена подача шлака к эрлифту;
— измененная конструкция металлической облицовки гранбассейна и качество ее выполнения способствуют зависанию шлака;
— вытяжные трубы установок грануляции выполнены с большим числом перегибов, протяженность каналов увеличена вдвое.

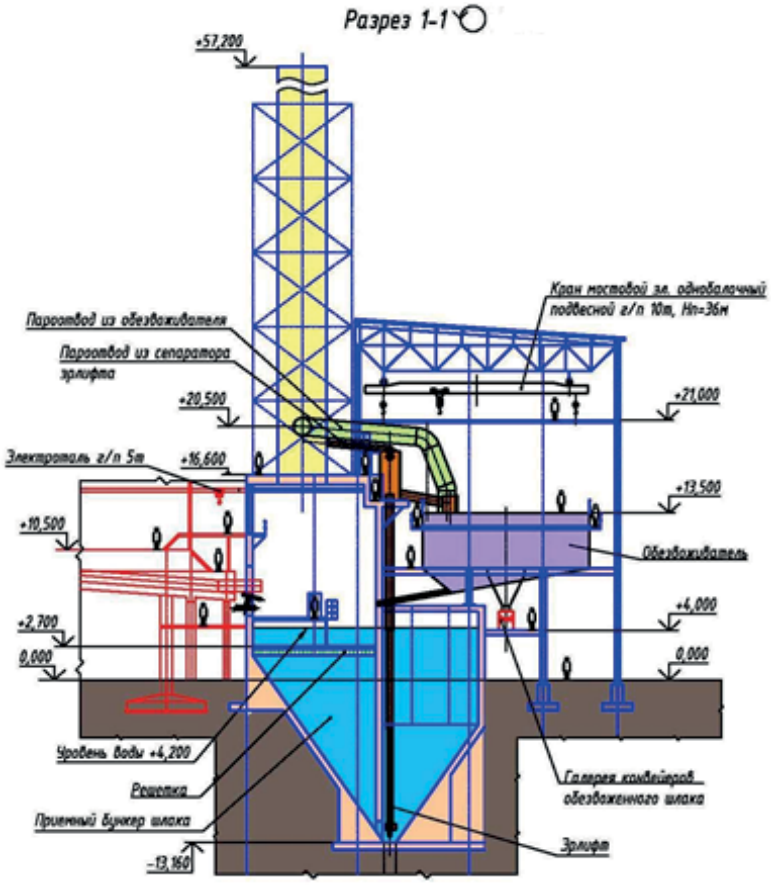


Рис. 3. Продольный разрез установки грануляции в Баотоу

В результате УПГШ работали с повышенным расходом сжатого воздуха, переизмельчением гранулированного шлака, плохим осветлением оборотной воды, забиванием мелким шлаком оборудования и трубопроводов, повышенным сопротивлением в тракте пароудаления, затрудняющим своевременную эвакуацию испарений из укрытия гранбассейна.

Специалисты ОАО «ВНИИМТ» в ходе аудита объяснили заказчику необходимость приведения УПГШ к требованиям технологического регламента, были раскрыты причины, особо влияющие на процесс грануляции.

Грануляция доменного шлака в АО «Тяньцзинская металлургическая группа»

В 2012–2013 гг. введен в эксплуатацию комплекс из двух доменных печей объемом по 1260 м^3. Для каждой доменной печи предусмотрены две автономные УПГШ по технологии ВНИИМТ. Специалисты ОАО «ВНИИМТ» разработали базисный инжиниринг на комплекс припечной грануляции шлака, комплексное задание на выполнение рабочего проекта, изготовили и поставили функциональные элементы эрлифтного оборудования, провели пусконаладочные работы.

В составе каждой УПГШ (правой и левой) предусматривается одна технологическая линия. Шлак выпускается каждые 2 ч через одну из двух леток попеременно, т. е. на каждую грануляционную установку жидкий шлак подается через каждые 4 ч. При нормальной работе шлаковые эрлифты и обезвоживатели обеих гранустановок работают постоянно и одновременно с производительностью 25 т/ч. Мониторы и насосы узлов грануляции работают попеременно с интервалом 1,3 ч. При аварийном или плановом ремонте одной из двух УПГШ производительность по гранулированному шлаку другой установки увеличивается до 50 т/ч за счет увеличения скорости вращения обезвоживателя с соответствующим повышением влажности гранулированного шлака и увеличением производительности эрлифта. Общий вид установки показан на рисунке 4.

Каждая установка грануляции выполнена в виде открытого сооружения из железобетонных конструкций. Оборудование (эрлифты, обезвоживатели) размещено на открытых площадках. Обслуживаются они при помощи стреловых автокранов. Пульт управления операторов размещен в отдельном помещении, установленном на площадке обслуживания УПГШ. Помещение оборудовано системой вентиляции и кондиционирования. В этом же помещении расположено оборудование системы АСУ ТП.

Рис. 4. Общий вид установки грануляции в Тяньцзине

В ходе отладки системы эксплуатационный персонал АО «Тяньцзинская металлургическая группа» выполнил несколько циклов слива чугуна из доменной печи в приемный отсек установки грануляции шлака. При этом установка грануляции работала в штатном режиме: взрывы, разрушения не зафиксированы. Чугун был гранулирован, поднят эрлифтом и обезвожен, что подтвердило высокую взрывобезопасность технологии диспергирования расплава над бассейном.

Несмотря на достаточно комфортные климатические условия, снижение капитальных затрат и удобство обслуживания оборудования, размещение установок грануляции вне закрытых зданий не рекомендуется. Опыт эксплуатации УПГШ в г. Тяньцзин показал, что требуется защита оборудования грануляции и обслуживающего персонала от неблагоприятных климатических факторов.

Следует особо отметить, что установки припечной грануляции ОАО «ВНИИМТ» являются полностью автономным участком: стоимость систем водоснабжения, трубопроводов с запорно-регулирующей арматурой, систем электроснабжения, систем АСУ ТП и других узлов входит в цену всего участка грануляции шлака (в отличие от установок грануляции других поставщиков).

3. ВЫВОДЫ

Опыт внедрения установок припечной грануляции шлака ОАО «ВНИИМТ» в КНР показал их высокие эксплуатационные характеристики. Китайскими специалистами отмечены надежность и высокая взрывобезопасность технологии, а также относительно малые капиталовложения. Отметим важность этапа пусконаладочных работ и необходимость участия разработчиков технологии в процессе выхода на заданные эксплуатационные характеристики.

Л.А. Зайнуллин, А.Ю. Епишин, ОАО «ВНИИМТ»
С.В. Филатов, ПАО «НЛМК»

ОХЛАЖДЕНИЕ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ МЕДНЫМИ ХОЛОДИЛЬНИКАМИ

Неотъемлемой частью конструкции доменной печи является система охлаждения, которая предохраняет кожух агрегата от воздействия высоких температур и огнеупорную кладку от разгара. В ходе работы доменной печи под воздействием различных факторов огнеупорная кладка может быть разрушена, и тогда система охлаждения должна обеспечить образование устойчивого гарнисажа. Как правило, для решения этой проблемы в настоящее время используют как чугунные, так и медные холодильники горизонтального или вертикального типа. Опыт эксплуатации показывает ряд недостатков чугунных холодильников по сравнению с медными, таких как низкая эффективность теплоотвода в водоохлаждаемых каналах из-за неплотностей между трубками и чугунным телом, низкая теплопроводность и др. Однако, на практике в процессе работы ДП-7 «Россиянка» ПАО «НЛМК», возникли проблемы со стойкостью медных холодильников. ОАО «ВНИИМТ» в 2016 г. была поставлена задача — провести расчетно-аналитическое обследование технического состояния медных холодильных плит системы охлаждения ДП-7 «Россиянка».

Система охлаждения печи включает 15 рядов холодильников: холодильники горна (три ряда) и фурменной зоны (один ряд), зоны заплечиков (два ряда) и шахты (девять рядов). В следствии наиболее высоких тепловых нагрузок холодильники заплечиков и нижней части шахты (5–9 ряды) были выполнены из меди марки М1Р.

ДП-7 ПАО «НЛМК» была пущена в эксплуатацию 30.08.2011 г.

Через 6 месяцев обнаружено практическое отсутствие керамической и бетонной защиты медных холодильников.

07.08.2015 г. — обнаружен первый пропавший контур в 6 ряду.

18.04.2016 г. — печь остановлена с выдувкой шихты до уровня верха

заплечиков для замены десяти холодильников с поврежденными контурами охлаждения . На момент остановки печи общее количество поврежденных контуров составило 29 из 192 (15%). Частота выхода из строя холодильников 6-го ряда с 7.08.2015 до 18.04.2016 — 1 контур за 8 дней.

24.08.2016 — вышли из строя 25 холодильников 6 ряда.

По состоянию на 17.10.2016 г. было 20 вышедших из строя холодильныхплит (17 в ряду ВЕ6 и 3 в ряду ВО5).

Целью расчетно-аналитического обследования технического состояния медных холодильников было выяснение причин выхода из строя медных плит, износа ребер и тела, выдача рекомендаций по возможным конструктивным изменениям, вносимым в существующее исполнение плит, замене материала холодильников. Охлаждение медных плит осуществляется потоком воды, проходящей снизу вверх по четырем отдельным каналам диаметром 50 мм, расположенных в теле холодильника на межосевом расстоянии 240 мм.

На рисунке 1 представлен общий вид системы охлаждения ДП-7.

Рис. 1. Система охлаждения ДП-7 ПАО «НЛМК»

В ходе расчета [1,2] определяли тепловой поток через медную стенку от рабочего пространства печи к охлаждающей воде при заданных условиях однозначности. Затем по рассчитанному тепловому потоку находили неизвестные по условию задачи температуру стенки на поверхности холодильника и температуру стенки охлаждающего канала (рисунок 2).

Расчетный анализ работы системы охлаждения существующих медных холодильников подтвердил, что при существующих технологических параметрах и условиях работы ДП-7 медные плитовые холодильники применяемой конструкции не обеспечивают проектный срок службы (рисунок 3). Четырехканальные холодильники 5, 6, 7, 8 и 9 рядов имеют прямые внутренние водоохлаждаемые каналы, расставленные на значительном расстоянии друг от друга, что приводит к существенным перепадам температур на поверхности плиты. По имеющейся информации слой огнеупора, нанесенный на оребренную поверхность холодильников и защищающий поверхность плит от перегрева и механического контакта с шихтовыми материалами, через 5–6 месяцев работы был разрушен. К тому же, визуальный

осмотр рабочего пространства печи, осуществленный в ходе замены поврежденных холодильников 6-го ряда, показал фактическое отсутствие гарнисажного слоя на стенках печи. Это означает, что поверхность плиты находится в экстремальных условиях, оставаясь незащищенной от возможных перегревов и механических воздействий.

Исходя из аналитических данных, существующие холодильники 5-го и 6-го рядов, находясь в непосредственной близости к фурменной зоне, более чем остальные подвержены риску перегрева поверхности ребра и тела. Использование меди марки М1Р с крупнозернистой структурой, внутренними дефектами и низкой температурой начала рекристаллизации (180 °С) с последующим разупрочнением, несомненно, приводит к малому сроку службы таких холодильников, что подтверждается на практике. Механический контакт шихтовых материалов с оголенной поверхностью холодильника, оказавшегося незащищенным огнеупорным бетоном, а при отсутствии гарнисажного слоя вследствие превышения температуры рекристаллизации 180 °С, подвергает ускоренному износу медную плиту.

Расчетным анализом установлено, что мероприятия связанные с попытками увеличения скорости охлаждающей воды в каналах медных плит вплоть до 5 м/с не защитят от износа холодильники 5-го и 6-го рядов вследствие большого перепада температур на поверхности тела и ребра холодильников. По-видимому, конструкция холодильников и система охлаждения была рассчитана на гарантированное наличие гарнисажного слоя.

Доменную печь нельзя отнести к тепловым агрегатам со стабильным тепловым состоянием, поэтому холодильники подвергаются различным тепловым воздействиям в зависимости от хода печи. Нельзя исключать и эпизодического превышения температуры разупрочнения марки меди М1Р по данным штатных термопар, которые не могут зафиксировать недолговременное местное превышение температуры на поверхности оголенного холодильника. Такое превышение температуры происходит одновременно с абразивным воздействием шихты, что резко ускоряет обычный абразивный износ. Это подтверждается косвенно и тем фактом, что на верхних холодильниках ребра практически сохранились, а на нижних они стерлись полностью. Следовательно, прочность холодильников 6-го и 5-го рядов снижалась в процессе эксплуатации из-за высокой температуры.

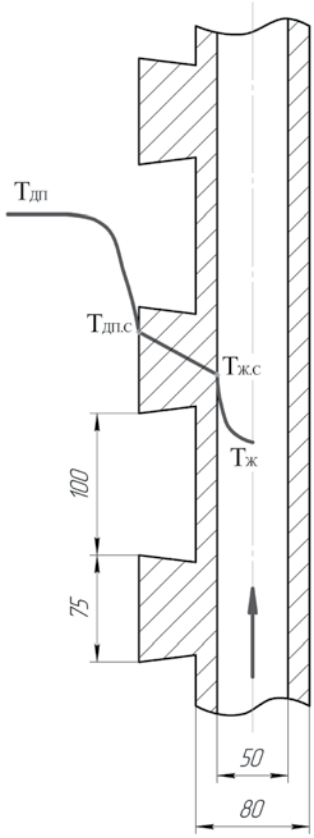


Рис. 2. Схематическое изображение процесса теплопередачи на ребре медного холодильника:

$T_{дп}$ — температура в рабочем пространстве доменной печи, $T_{дп.с}$ — температура стенки медного холодильника со стороны доменной печи, $T_{ж.с}$ — температура стенки медного холодильника со стороны охлаждающего канала, $T_{ж}$ — температура охлаждающей жидкости (воды)

Фотографии разрушенных плит (рисунок 4) подтверждают теоретические доводы о том, что на поверхности медного холодильника имеет место волнообразное температурное поле со значительными перепадами температур. При осмотре холодильников проблемного 6-го ряда подтвердил волнообразный характер износа плит. В районе охлаждающего канала в некоторых местах плиты ребра частично сохраняются, а в области между каналами, напротив, в связи со значительным истиранием меди наблюдается прогиб профиля плиты. Это доказывает тот факт, что прочностные свойства меди значительно ухудшаются с ростом температур на ее поверхности после превышения температуры рекристаллизации, износ плиты повышается, а профиль износа соответствует температурному полю, полученному расчетным путем.

Локальный износ не может быть вызван только постоянно сходящими шихтовыми материалами, то есть на одной плите может присутствовать как изношенный до «дыр» участок (прогар), так и участок с частично сохраненными ребрами. Такое местное разрушение холодильников, возможно, связано с контактом жидких продуктов плавки с оголенной поверхностью, а не только лишь с ускоренным механическим истиранием перегретой плиты. Локальное образование гарнисажа на плитах возможно

при натекании жидкой шлаковой фазы, а жидкая металлическая фаза негативно воздействует на незащищенную медную стенку, приводя к локальному износу поверхности плиты за счет поверхностного оплавления или размягчения с последующим стиранием твердыми частицами шихты.

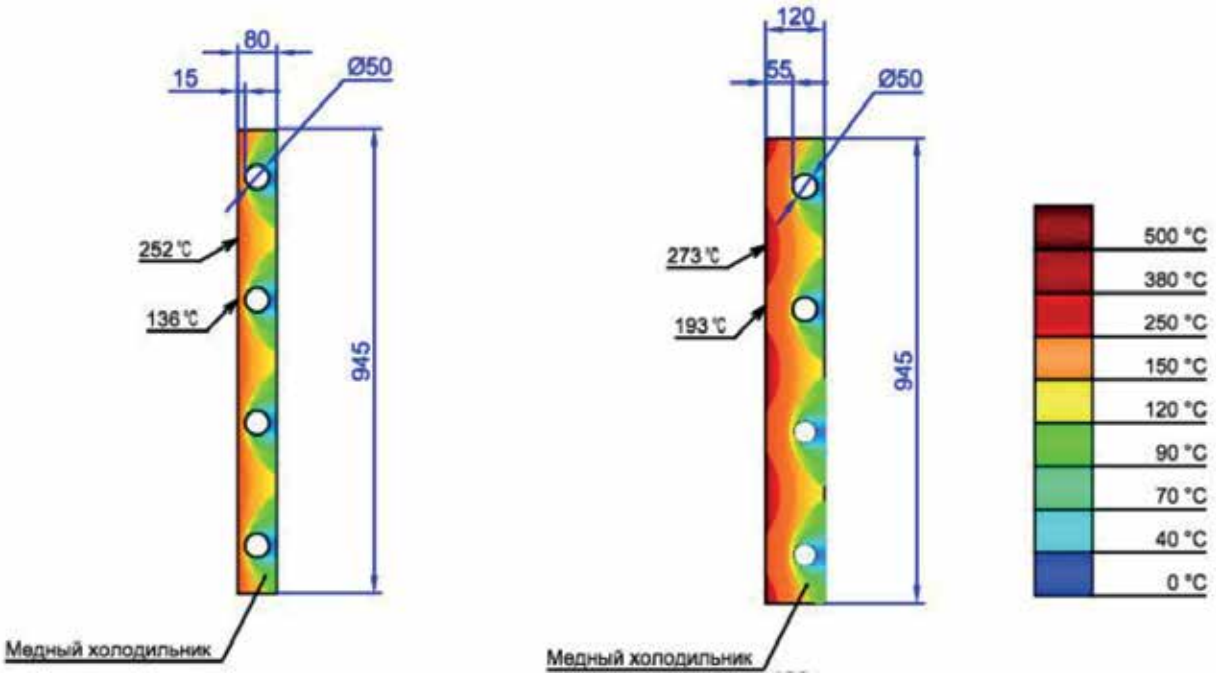


Рис. 3. Температурное поле медного холодильника 5, 6 рядов, установленное расчетно-аналитическим способом. Указаны температуры на поверхности тела — рисунок слева и на поверхности ребра — рисунок справа

Рис. 4. Вышедшие из строя медные холодильники 6-го ряда

В ходе проведения расчетных и аналитических исследований работы медных холодильников установлено, что для выравнивания температурного поля и понижения температур на поверхности медной оголенной плиты следует рекомендовать для 5-го и 6-го рядов восьмиканальное исполнение холодиль-

ника с диаметром канала 34 мм при фактическом сохранении существующих расходов и скоростей воды в каналах.

С целью сохранения целостности холодильника и предотвращения его выхода из строя рекомендуется также замена меди марки М1Р на марку МСР01/МРО, температура начала рекристаллизации которых не ниже 350 °С. Плиты из указанных марок даже в условиях запредельных температур у незащищенной поверхности не выйдут из строя до расчетного срока службы.

Список литературы

1. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Sukhanov E.L., Ovchinnikov Yu.N., Shvydkiy V.S. Teplotekhnika domennogo protsessa [Heat engineering of blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya,1978, 248 p.
2. Shvydkiy V.S. Matematicheskie metody teplofiziki [Mathematical methods of thermophysics]. Moscow: Mashinostroenie, 2001, 232 p.

Г.А. Нечкин, А.Ю. Чернавин, В.А. Кобылев, ООО «ПРОМИНТЕХ-НКА»
А.В. Дьяков, А.А. Одинцов, АО «АрселорМиттал Темиртау»
ОПТИМИЗАЦИЯ АГЛОДОМЕННЫХ ШИХТ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНОЙ ОЦЕНКИ КОМПЛЕКСА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ 254

И.П. Беликов, ООО «БАШМИНЕРАЛ-РЕСУРС»
Г.Е. Исаенко, ПАО «НЛМК»
Г.А. Нечкин, А.Ю. Чернавин, Д.А. Чернавин, В.А. Кобылев, ООО «ПРОМИНТЕХ-НКА»
ОФЛЮСОВАНИЕ ОКАТЫШЕЙ МАРГАНЦОВИСТЫМ ИЗВЕСТНЯКОМ — СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ 263

М.И. Стуков, А.Ю. Чернавин, В.А. Кобылев, Д.А. Чернавин, К.П. Ивашиненко, ООО «ПРОМИНТЕХ-НКА»
КОМПЛЕКС МЕТОДИК И ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ КОКСА И ШЛАКОВ В ЗОНЕ ПЛАВЛЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ 268

Р.В. Петухов, Г.Ю. Витькина, А.Н. Дмитриев, ИМЕТ УрО РАН
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИТАНОМАГНЕТИТОВОГО СЫРЬЯ (ВОССТАНОВИМОСТЬ, «ГОРЯЧАЯ» ПРОЧНОСТЬ, ИНТЕРВАЛ РАЗМЯГЧЕНИЯ) НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ 275

В.И. Носенко, А.Н. Филатов, ООО «Русское горно-химическое общество»
Г.А. Нечкин, В.А. Кобелев, ОАО «Уральский институт металлов»,
ПРИМЕНЕНИЕ МАГНЕЗИАЛЬНОГО ФЛЮСА «ФЛЮМАГ М» В АГЛОДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ . 283

Раздел VI
СОВРЕМЕННЫЙ ПРОЦЕСС ПОДГОТОВКИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ И ПУТИ ЕГО РАЗВИТИЯ

Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, НИТУ «МИСиС»
А.Н. Шаповалов, НФ НИТУ «МИСиС»
РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ УПРОЧНЕНИЯ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ АГЛОМЕРАТОВ НА ОСНОВЕ МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА СПЕКА 288

В.В. Темников, АО «ЕВРАЗ НТМК»
УТИЛИЗАЦИЯ ШЛАКОВ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ В АГЛОПРОИЗВОДСТВЕ 296

Д.Н. Волков, А.Л. Мамонов, А.А. Парфенов, ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат»
ПРОИЗВОДСТВО АГЛОМЕРАТА С СОДЕРЖАНИЕМ ЖЕЛЕЗА 62% 301

В.Г. Дружков, ТМиЛП ФГБОУ ВО «МГТУ»
И.В. Макарова, И.Е. Прохоров, ПАО «ММК»
РАЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЦЕПИ АППАРАТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ПО КРУПНОСТИ АГЛОМЕРАТА 307

В.В. Матлашевский, А.В. Калашников, ООО «Металлургпромснаб»,
В.А. Кобелев, ОАО «Уральский институт металлов»
Г.А. Нечкин, ОАО «Уральский институт металлов», ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет»
КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНВЕРТОРНОГО НИКЕЛЕВОГО ШЛАКА НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ 310

Г.А. Нечкин, А.Ю. Чернавин, В.А. Кобылев,
ООО «ПРОМИНТЕХ-НКА»
А.В. Дьяков, А.А. Одинцов,
АО «АРСЕЛОРМИТТАЛ ТЕМИРТАУ»

ОПТИМИЗАЦИЯ АГЛОДОМЕННЫХ ШИХТ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНОЙ ОЦЕНКИ КОМПЛЕКСА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В качестве железорудных материалов для производства агломерата в АО «АрселорМиттал Темиртау» используется местное сырье Республики Казахстан: тонкоизмельченный концентрат ССГПО, гравитационно-магнитный концентрат ЛГМК, магнетитовые руды Атасуйского железорудного района (месторождения Западный Каражал, Кентобе и Атансор). Разнородное по химическому составу и физическим свойствам железорудное сырье нуждается в оптимизации компонентного состава, исходя из технологических показателей процесса спекания и качества агломерата. В доменной плавке большое влияние на технологические показатели оказывают высокотемпературные свойства агломерата: температуры размягчения-плавления и фильтруемость расплава через коксовую насадку.

В целях оптимизации железорудного состава шихты проведены лабораторные исследования по спеканию аглошихт разного компонентного состава с определением технологических показателей и комплекса металлургических свойств. Для исследования выбраны восемь составов железорудной части аглошихты (таблица 1) и десять вариантов доменной шихты (таблица 2).

Исследования показали, что показатели процесса спекания шихт разного компонентного состава и качество агломерата зависят от их соотношения, особенно это касается концентратов ЛГМК и ССГПО. На рисунке 1 приведены зависимости удельной производительности и прочности агломерата от содержания концентрата ССГПО в шихте, которые носят экстремальный характер. Максимальная производительность достигается при содержании в шихте 15% концентрата ССГПО. Минимальная прочность агломерата получается при содержании в шихте 30% концентрата ССГПО. Зависимости удельной производительно-

сти и прочности агломерата от содержания концентрата ЛГМК в шихте носят зеркальный характер по отношению к концентрату ССГПО. Максимальная производительность достигается при содержании в шихте 40% концентрата ЛГМК.

Таблица 1. Компонентный состав, показатели процесса спекания шихты и прочность агломерата по вариантам А-1 — А-8

Показатели	Варианты								
	А1–Д1	А1–Д2	А2	А3	А4	А5	А6	А7	А8
Состав аглошихты,%									
а/р Атасу	20	20	20	20	20	20	35	50	50
а/р Кентобе	15	15	15	15	15	15	15	15	0
а/р Атансор	10	10	10	10	10	10	10	10	0
к-т ССГПО	45	45	55	30	15	0	30	30	15
к-т ЛГМК	10	10	0	25	40	55	10	10	35
Вертикальная скорость спекания, мм/мин	16,32	17,03	15,30	16,54	17,5	17,34	18,54	18,9	15,75
Выход годного,%	86,1	89,2	85,3	85,8	89,0	86,8	90,5	88,2	88,4
Удельная производительность, т/м²·ч	1,331	1,455	1,296	1,346	1,397	1,251	1,578	1,604	1,310
Прочность $Б_{+5\ мм}$,%	74,6	75,1	78,1	72,8	75,0	75,1	75,0	73,4	74,6
Истираемость $Б_{-0,5\ мм}$,%	5,1	4,8	4,8	4,9	5,5	6,4	5,3	5,9	6,3

Таблица 2. Варианты состава доменной шихты

Варианты		Содержание в шихте,%		
		Агломерат	Окатыши ССГПО	Руда Атасу
Д1	1	А1 — 75	20	5
	2	А3 — 75	20	5
	3	А4 — 75	20	5
	4	А1 — 75	20	Никелевый шлак 5
Д2	5	А1 — 60	35	5
	6	А2 — 60	35	5
	7	А5 — 60	35	5
Д3	8	А6 — 90	5	5
	9	А7 — 90	5	5
	10	А8 — 90	5	5

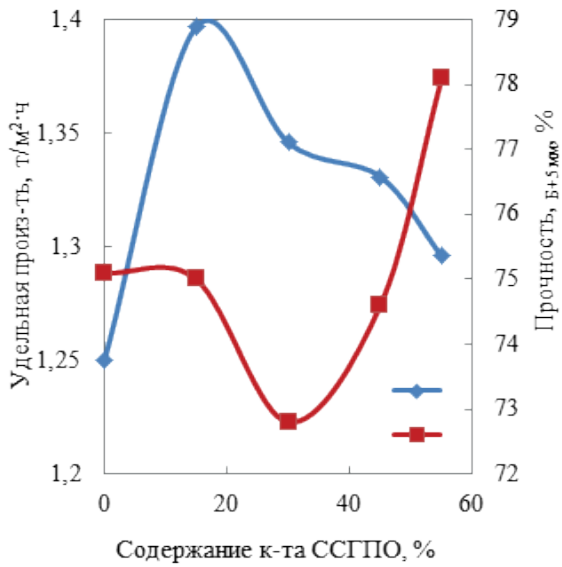


Рис. 1. Влияние содержания концентрата ССГПО в шихте на удельную производительность и прочность агломерата

Минимальная прочность агломерата при содержании в шихте 25% концентрата ЛГМК. При содержании в базовой шихте 15% концентрата ССГПО и 40% концентрата ЛГМК обеспечивается максимальная удельную производительность агломерационного процесса. При таком составе шихты прочность агломерата соответствует базовому уровню. При нулевом содержании концентрата ЛГМК в шихте (55% концентрата ССГПО) прочность агломерата самая высокая, но это связано с более высокой основностью шихты А2. При содержании в шихте 30% концентрата ССГПО и 25% концентрата ЛГМК агломерат имеет минимальную прочность при удельной производительности несколько выше базового варианта. Таким образом, в базовом варианте шихты следует избегать соотношений концентратов ССГПО и ЛГМК близких к 1.

Серия спеканий шихт А6-А8 характеризуется, наряду с изменением содержания концентратов ССГПО и ЛГМК, изменением доли аглоруд в шихте. Вариант А6 близок по составу к варианту А3, но имеет меньшее содержание концентрата ЛГМК и повышенное содержание атасуйской аглоруды. Если сравнивать показатели спекания шихт А3 и А6, то последняя отличается более высокой вертикальной скоростью спекания, высоким выходом годного и более высокой удельной производительностью. Агломерат, полученный из шихты А6, обладает более высокой прочностью, чем агломерат из шихты А3. Вариант шихты А7 по составу близок к варианту А1, но имеет более высокое содержание атасуйской аглоруды и более низкое содержание концентрата ССГПО. Сравнение показателей спеканий этих двух шихт показывает, что шихта А7 имеет более низкую оптимальную влажность, более высокую вертикальную скорость спекания, более высокий выход годного и, соответственно, более высокую удельную производительность. Прочность агломерата из шихты А7 ниже, чем из шихты А1. Шихта А8 по составу концентратов близка к шихте А4, но аглоруды Кентобе и Атансор выведены из состава и заменены атасуйской аглорудой. Показатели спекания шихты А8 хуже, чем шихты А4. Ниже вертикальная скорость спекания, ниже удельная производительность и прочность агломерата.

Таким образом, составы шихт А6-А8 по показателям спекания и прочности агломерата отличаются от аналогичных составов шихт А1, А3 и А4. Составы шихт А6-А7 имеют более высокие показатели процесса спекания и более высокую прочность агломерата. На рисунке 2, 3 приведены показатели удельной производительности и прочности агломератов, полученных из шихт А1-А8.

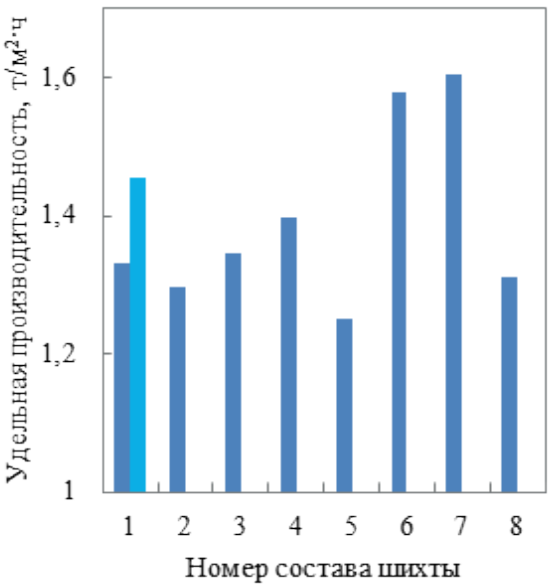


Рис. 2. Удельная производительность при спекании шихт А1-А8

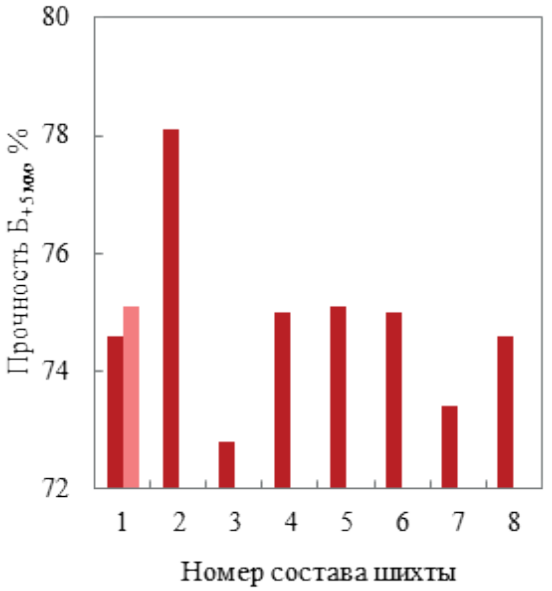


Рис. 3. Прочность агломерата при спекании шихт А1-А8

На основе базовой шихты А1 проведены спекания с заменой части аглоруд никелевым шлаком в количестве 25, 50 и 100 кг/т агломерата с эквивалентной заменой аглоруд. При расчете шихты была произведена корректировка расхода известняка. Результаты спеканий показывают, что при замене аглоруд никелевым шлаком требуется увеличение расхода твердого топлива против базового состава. Гранулометрический состав окомкованной шихты с никелевым шлаком изменяется несущественно, но вертикальная скорость спекания по сравнению с базовым вариантом растет. С учетом выхода годного удельная производительность по сравнению с базовым вариантом растет на 17,5–23,4 отн.%.

Замена аглоруд никелевым шлаком способствует увеличению прочности агломерата. Наибольшая прочность достигнута при вводе в шихту 100 кг/т никелевого шлака. Высокая прочность этого агломерата связана с высоким содержанием FeO.

Таким образом, частичная замена в агломерационной шихте аглоруд никелевым шлаком способствует повышению удельной производительности аглочаши и прочности агломерата. На рисунке 4

приведена зависимость удельной производительности и прочности агломерата от расхода никелевого шлака в шихте А1.

Положительное влияние на процесс спекания шихты и прочность агломерата предположительно объясняется минеральным составом никелевого шлака. Основным минералом является фаялит $2FeO{\cdot}SiO_2$, который характеризуется низкой температурой плавления — 1205 °С [1]. Образование низкотемпературного расплава способствует более полной ассимиляции кремнезема железорудных материалов и оксидов кальция и магния флюсовой части шихты. Быстрое и более полное растворение пустой породы и флюсов позволяет полнее раскристаллизовать силикатную связку и тем самым повысить прочность агломерата. Повышение вертикальной скорости спекания можно объяснить также изменением процессов плавления и кристаллизации расплава, формирующих газопроницаемую структуру шихты в зоне плавления. Негативным фактором при вводе никелевого шлака является снижение содержания железа в агломерате и увеличение содержания кремнезема, что требует увеличения расхода известняка и, соответственно, твердого топлива при больших расходах никелевого шлака в шихте.

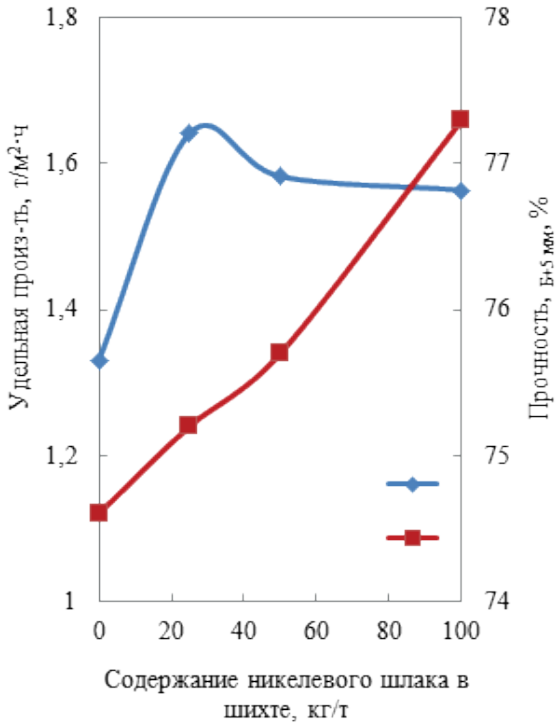


Рис. 4. Влияние содержания никелевого шлака в шихте А1–Д1 на удельную производительность и прочность агломерата

Высокотемпературные свойства железорудных материалов характеризуют их поведение в доменной печи при нагреве в восстановительной среде: восстановимость, разрушаемость при восстановлении и температурный интервал размягчения-плавления. Эти свойства железорудных материалов оказывают существенное влияние на газопроницаемость столба шихты в доменной печи и в значительной степени определяют производительность [2, 3]. Параметры вязко-пластичного состояния ЖРМ определяют положение и размер зоны когезии в доменной печи, при этом газодинамическое сопротивление этой зоны на 70% определяет сопротивление всего столба шихты. В связи с этим очень важным направлением исследований является определение температур размягчения и плавления агломератов [4].

Определение параметров вязко-пластичного состояния железорудных материалов произведено по ГОСТ 26517–85 «Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения температуры начала размягчения и температурного интервала размягчения» и предназначен для определения свойств железорудных материалов доменной плавки в условиях, приближенных к условиям в доменной печи. Чем выше температура размягчения и чем меньше температурный интервал вязко-пластичного состояния испытанного железорудного материала, тем в большей мере он может удовлетворять условиям доменной плавки.

По описанной методике проведено исследование параметров вязко-пластичного состояния окатышей ССГПО и лабораторных агломератов. Результаты испытаний приведены в таблице 3. На рисунке 5 приведена диаграмма температурного интервала размягчения-плавления исследованных железорудных материалов, которая позволяет оценить влияние железорудных материалов на расположение зоны когезии в доменной печи.

Результаты исследований показывают, что наиболее низкая температура начала размягчения у руды Атасу, при этом интервал вязко-пластичного состояния достаточно протяженный. Окатыши также имеют низкую температуру начала размягчения и плавятся при более высокой температуре, чем руда Атасу. Вместе с рудой Атасу окатыши формируют в доменной печи протяженную зону когезии на высоком горизонте и способствуют увеличению газодинамического напряжения. Температура размягчения никелевого шлака близка к температуре размягчения окатышей, но температура плавления значительно ниже, а ТИРП самый узкий по сравнению с другими материалами.

Таблица 3. Параметры пластично-вязкого состояния железорудных материалов

Железорудные материалы	Температура размягчения $T_р$, °C	Температура плавления $T_{пл}$,°C	Температурный интервал размягчения-плавления (ТИРП) $T_{пл}$-$T_р$, °C
Агломерат А1 — Д1	1101	1452	351
Агломерат А1 — Д2	1123	1230	107
Агломерат А2	1168	1317	149
Агломерат А3	1107	1270	163
Агломерат А4	1122	1366	244
Агломерат А5	1066	1337	271
Агломерат А6	1163	1430	267
Агломерат А7	1112	1422	310
Агломерат А8	1165	1397	232
Агломерат А1–Д1(с никелевым шлаком)	1160	1438	278
Руда Атасу	995	1263	268
Окатыши ССГПО	1042	1302	260
Никелевый шлак	1051	1120	69

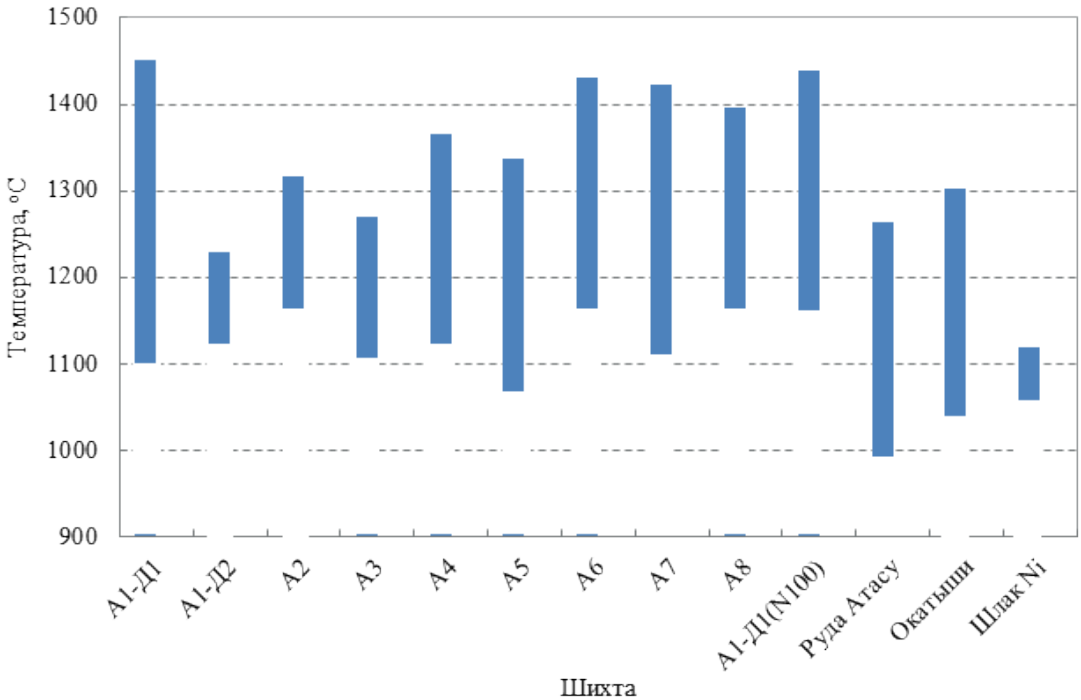


Рис. 5. Интервалы температур размягчения-плавления железорудных материалов

Агломерат А1-Д1 имеет самую протяженную зону вязко-пластичного состояния (ТИРП=351°С), определяемую как низкой температурой начала размягчения, так и высокой температурой плавления. Применение в доменной шихте агломерата А1-Д1 с окатышами ССГПО будет способствовать увеличению нижнего перепада в доменной плавке.

Вариант агломерата А1-Д1 с никелевым шлаком отличается от базового более высокой температурой начала размягчения и более узким интервалом вязко-пластичного состояния. Его применение в базовом варианте должно способствовать снижению газодинамического напряжения в печи.

Агломерат А3 по сравнению с А1-Д1 имеет более низкую температуру плавления, что будет способствовать сужению интервала вязко-пластичного состояния, приближая его к ТИРП окатышей. Агломерат А4 по сравнению с А3 имеет более высокую температуру плавления и более протяженный ТИРП, что несколько увеличивает зону когезии, однако она по расположению близка к таковой для окатышей.

Для варианта доменной шихты Д1 с 20% окатышей ССГПО по высокотемпературным свойствам предпочтительным является вариант агломерата А3 и агломерата А4. На рисунке 5 видно, что диапазоны размягчения-плавления окатышей и агломератов А3 и А4 совпадают.

Повышение основности агломерата А1-Д2 по сравнению с А1-Д1 приводит к значительному снижению температуры плавления и сужению интервала вязко-пластичного состояния, приближая его к ТИРП окатышей. Агломерат А2 по сравнению с А1-Д2 имеет более высокие температуры размягчения-плавления и более протяженный ТИРП, что может способствовать увеличению газодинамического сопротивления в доменной печи. Агломерат А5 по сравнению с А2 имеет более низкую температуру размягчения и более высокую температуру плавления, однако, несмотря на увеличение ТИРП, диапазон вязко-пластичного состояния ближе к окатышам, что может способствовать более быстрому формированию промежуточного шлака в доменной печи.

Таким образом, с учетом высокотемпературных свойств преимущество перед другими вариантами имеет агломерат А1-Д2, обладающий наиболее близкими к окатышам характеристиками и минимальным интервалом вязко-пластичного состояния (рисунок 5).

Высокотемпературные свойства агломератов А6-А8 при низкой доле окатышей в основном определяют положение и протяженность зоны когезии в доменной плавке. Наиболее узкий интервал вязко-пластичного состояния у агломерата А8. По сравнению с ним агломерат А6 отличается более высокой температурой плавления и более протяженным ТИРП. Агломерат А7 по сравнению с предыдущими имеет более низкую температуру размягчения, за счет чего ТИРП возрастает и превышает по величине ТИРП агломерата А6.

Таким образом, для варианта доменной шихты Д3 наилучшие высокотемпературные свойства имеет агломерат А8, который имеет наименее протяженную зону вязко-пластичного состояния и, соответственно, более низкое газодинамическое сопротивление.

Зона фильтрации продуктов плавки через коксовую насадку является продолжением зоны когезии, и характер взаимодействия коксовой насадки с расплавами и газами определяет нормальную работу горна и различные расстройства, связанные с загромождением коксовой насадки неплавкими массами [2, 5–11].

Исследования фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку проведены для лабораторных агломератов, окатышей ССГПО, руды Атасу и 10 доменных шихт, состоящих из руды Атасу, агломерата и окатышей ССГПО по вариантам Д1-Д3. Результаты определения показателей фильтруемости продуктов плавки железорудных материалов и доменных шихт через коксовую насадку приведены в таблице 4.

Исследования плавления агломератов А1-А5 показывают, что наилучшие показатели фильтруемости для доменной шихты Д1 имеют агломераты А3 и А4. При практически одинаковых показателях общей фильтруемости продуктов плавки и фильтруемости шлака время плавления агломерата А4 меньше. Агломерат А1-Д1 имеет более низкую степень фильтрации шлака через коксовую насадку и большее время плавления. Введение в состав аглошихты А1-Д1 никелевого шлака взамен части аглоруд улучшает фильтруемость шлака и снижает время плавления агломерата.

Агломераты для доменной шихты Д2 имеют более высокую основность промежуточного шлака и это влияет на их показатели фильтруемости через коксовую насадку. Для этой шихты наиболее высокие показатели имеет агломерат А5.

Несмотря на более низкую общую фильтруемость продуктов плавки, чем у агломерата А1-Д2, агломерат А5 отличается более высокой фильтруемостью шлака и меньшим временем плавления. Самые низкие показатели имеет агломерат А2.

Для доменной шихты Д3 наилучшие показатели фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку имеет агломерат А7. Агломерат А6 из трех агломератов имеет самую низкую степень фильтрации продуктов плавки и шлака при самом большом времени плавления. Агломерат А8 имеет несколько худшие показатели фильтруемости, чем агломерат А7, но самое меньшее время плавления.

Таблица 4. Показатели фильтруемости продуктов плавки железорудных материалов через коксовую насадку

Железорудные материалы		Показатели			Выход шлака, кг/т чуг.	Остается на коксовой насадке, кг/т чуг.
		Фильтруемость продуктов плавки $F_{пп}$,%	Фильтруемость шлака $F_{шл}$,%	Время плавки τ, мин		
Агломерат А1 — Д1		93,5	80,5	58	494,1	96,4
Агломерат А1 — Д2		89,3	70,0	58	541,5	162,5
Агломерат А2		84,9	50,6	64	451,4	223,0
Агломерат А3		94,9	85,6	50	485,7	70,2
Агломерат А4		94,7	85,7	47	537,5	76,9
Агломерат А5		94,5	87,0	50	636,2	82,7
Агломерат А6		88,3	63,8	48	509,7	184,5
Агломерат А7		95,2	87,3	46	553,0	70,2
Агломерат А8		91,2	73,8	44	518,7	135,9
Агломерат А1–Д1(с никелевым шлаком)		94,5	83,7	46	576,9	94,0
Руда Атасу		92,2	62,1	48	208,5	79,0
Окатыши ССГПО		92,1	63,8	45	137,3	49,7
Д1	Атасу 5, А1 75, ок. 20%	84,9	60,4	39	394,1	156,3
	Атасу 5, А3 75, ок. 20%	89,3	72,8	43	429,4	116,8
	Атасу 5, А4 75, ок. 20%	89,5	73,1	40	467,5	125,8
	ШлакNi 5, А1 75, ок.20%	93,9	80,9	31	465,2	88,9
Д2	Атасу 5, А1 60, ок. 35%	88,3	67,5	37	361,9	117,6
	Атасу 5, А2 60, ок. 35%	89,2	65,9	44	345,1	117,7
	Атасу 5, А5 60, ок. 35%	90,6	79,1	39	442,4	92,5
Д3	Атасу 5, А6 90, ок. 5%	89,4	73,2	40	470,7	126,2
	Атасу 5, А7 90, ок. 5%	88,7	73,5	43	508,2	134,7
	Атасу 5, А8 90, ок. 5%	88,7	70,9	46	478,5	91,4

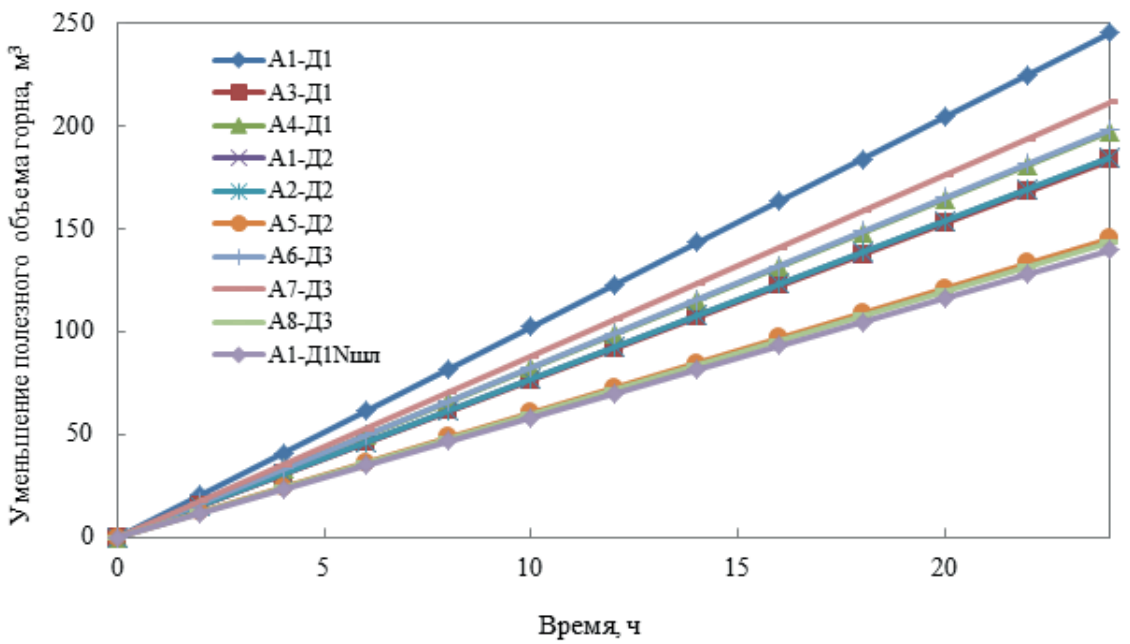


Рис. 6. Динамика накопления шлака на коксовой насадке при использовании доменных шихт Д1-Д3

Руда Атасу и окатыши ССГПО при плавлении имеют относительно высокую общую степень фильтруемости продуктов плавки, но низкую фильтруемость шлака через коксовую насадку. Время плавления этих материалов не превышает показателей плавления лучших агломератов.

Проплавка доменных шихт показала, что особенности фильтрации отдельных железорудных материалов сохраняются и в шихтах (таблица 4). Сравнение фильтруемости трех вариантов составов доменной шихты Д1 показывает, что наиболее высокие показатели имеет шихта, состоящая из 75% агломерата А4, 20% окатышей и 5% руды Атасу. Для доменной шихты Д2 наиболее высокие показатели фильтруемости продуктов плавки и шлака имеет шихта, состоящая из 60% агломерата А5, 35% окатышей и 5% руды Атасу. Для доменной шихты Д3 наиболее высокие показатели фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку имеет шихта, состоящая из 90% агломерата А7, 5% окатышей и 5% руды Атасу.

Если пересчитать количество оставшегося в лабораторных условиях на коксовой насадке шлака в объем загроможденной коксовой насадки в доменной печи с учетом 100% заполнения шлаком межкускового пространства и 50% отработки этого шлака во время выпуска, то возможное уменьшение полезного объема для доменной печи № 3 при использовании доменных шихт Д1-Д3 будет выглядеть как на рисунке 6. Наименьшее возможное уменьшение полезного объема за счет загромождения коксовой насадки шлаком будет при использовании шихт А5-Д2 и А8-Д3. Максимальное уменьшение полезного объема при использовании базовой шихты А1-Д1. Остальные шихты по этому показателю занимают промежуточное положение.

ВЫВОДЫ

По показателям спекания и прочности агломерата составы шихт А6-А8 отличаются от аналогичных составов шихт А1, А3 и А4. Наиболее высокие результаты по удельной производительности получены при спекании шихт А6-А7. Наиболее высокая прочность у агломерата, полученного из шихты А2 и шихт А4-А6. Повышение производительности аглопроцесса может быть достигнуто при оптимизации компонентного состава агломерационной шихты. Оптимальный расход лисаковского ГМК в шихту менее 100 кг/т агломерата, а оптимальный расход концентрата ССГПО составляет около 200 кг/т агломерата.

Ввод в шихту А1 никелевого шлака в количестве 25–100 кг/т взамен части аглоруд способствует повышению удельной производительности с 1,331 до 1,564–1,642 т /м^2·ч. Никелевый шлак в аглошихте А1 способствует повышению прочности агломерата (Б+5 мм) с 74,6 до 75,2–77,3%.

Для варианта доменной шихты Д1 с 20% окатышей ССГПО по высокотемпературным свойствам предпочтительным является вариант агломерата А3, отличающийся наименее протяженной зоной вязко-пластичного состояния, а также агломерат А4, у которого зона вязко-пластичного состояния по расположению близка к таковой для окатышей.

Вариант агломерата А1-Д1 с никелевым шлаком отличается от базового более высокой температурой начала размягчения и более узким интервалом вязко-пластичного состояния. Его применение в базовом варианте должно способствовать снижению газодинамического напряжения в печи.

Для варианта доменной шихты Д2 с 35% окатышей по высокотемпературным свойствам преимущество перед другими вариантами имеет агломерат А1-Д2, обладающий наиболее близкими к окатышам характеристиками и минимальным интервалом вязко-пластичного состояния.

Для варианта доменной шихты Д3 с 5% окатышей наилучшие высокотемпературные свойства имеет агломерат А8, который характеризуется наименее протяженной зоной вязко-пластичного состояния и более низким газодинамическим сопротивлением.

Наилучшие показатели фильтруемости для доменной шихты Д1 имеют агломераты А3 и А4. Введение в состав аглошихты А1-Д1 никелевого шлака в количестве 100 кг/т взамен части аглоруд улучшает фильтруемость шлака и снижает время плавления агломерата.

Для доменной шихты Д2 наиболее высокие показатели фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку имеет агломерат А5. Несмотря на более низкую общую фильтруемость продуктов плав-

ки, чем у агломерата А1-Д2, агломерат А5 отличается более высокой фильтруемостью шлака и меньшим временем плавления.

Для доменной шихты Д3 наилучшие показатели фильтруемости продуктов плавки через коксовую насадку имеет агломерат А7.

Сравнение фильтруемости трех вариантов составов доменной шихты Д1 показывает, что наиболее высокие показатели имеет шихта, состоящая из 75% агломерата А3, 20% окатышей и 5% руды Атасу.

Список литературы

1. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Основы формирования функциональных свойств железорудных агломератов. Екатеринбург: 2015. 352 с.
2. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Функциональные свойства железорудных материалов. Екатеринбург: 2015. 617 с.
3. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Введение в технологии металлургического структурообразования. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 501 с.
4. Кобелев В.А., Пузанов В.П., Нечкин Г.А. Температура плавления железорудных агломератов. Сталь. 2015. №11.
5. Пузанов В.П., Нечкин Г.А., Кобелев В.А., Чернавин А.Ю. Об интенсивности орошения коксовой насадки и фильтруемости продуктов плавки доменной печи. Бюллетень научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. 2011. Вып. 8. С. 45–54.
6. Пузанов В.П., Нечкин Г.А., Онорин О.П., Кобелев В.А., Чернавин А.Ю. О плотности орошения продуктами плавки коксовой насадки доменной печи, Сталь, 2012, №4. С. 7–15.
7. Нечкин Г.А., Кобелев В.А., Чернавин Д.А. Чернавин А.Ю. Фильтруемость доменных шлаков через коксовую насадку горна доменных печей. Труды Международного конгресса по агло-коксо-доменному производствам, Ялта, Украина, 21–25 мая 2012.
8. Пузанов В.П., Нечкин Г.А., Птичников Г.А., Кобелев В.А., Чернавин А.Ю. Основы работы противоточной коксовой насадки доменной печи (сообщение 2), Сталь, 2012, № 8.
9. Нечкин Г.А., Кобелев В.А. Исследование межфазных процессов, проходящих на границе раздела «кокс-шлак». Труды Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов», Москва, 28–29 ноября 2012.
10. Нечкин Г.А., Кобелев В.А., Чернавин А.Ю. Формирование доменной шихты с целью улучшения фильтруемости расплава через коксовую насадку горна. Труды VI Международного Конгресса по агло-коксо-доменному производствам «Проблемы доменного и смежных производств в современных условиях», Ялта, Украина 20–24 мая 2013.
11. Чернавин А.Ю., Нечкин Г.А., Чернавин Д.А., Кобелев В.А., Филатов С.В. Моделирование поведения шихтовых материалов в нижней части доменной печи, Сталь, 2010, №5. С. 20–23.

И.П. Беликов, ООО «БАШМИНЕРАЛ-РЕСУРС»
Г.Е. Исаенко, ПАО «НЛМК»
Г.А. Нечкин, А.Ю. Чернавин, Д.А. Чернавин, В.А. Кобылев, ООО «ПРОМИНТЕХ-НКА»

ОФЛЮСОВАНИЕ ОКАТЫШЕЙ МАРГАНЦОВИСТЫМ ИЗВЕСТНЯКОМ — СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Проведенные ранее исследования показали, что использование в доменных печах неофлюсованных окатышей Михайловского, Лебединского и Соколовско-Сарбайского ГОКов приводит к загромождению коксовой насадки горна, снижению производительности и повышению расхода кокса. Основной причиной является широкий интервал вязко-пластичного состояния и неудовлетворительная фильтруемость шлаковой части окатышей через коксовую насадку в доменной печи. В таблице 1 приведены показатели высокотемпературных свойств неофлюсованных окатышей различных ГОКов.

Офлюсованные окатыши по сравнению с неофлюсованными имеют более узкий интервал вязко-пластичного состояния и лучшую фильтруемость продуктов плавки через коксовую насадку. Использование в доменной плавке офлюсованных окатышей уменьшает газодинамическое сопротивление зоны когезии доменной печи, устраняет прогрессивное загромождение горна, интенсифицирует процесс производства чугуна и повышает его экономическую эффективность.

В 70–80 гг. прошлого века производились попытки замены бентонита в шихте при производстве окатышей гашеной и негашеной известью, мергелем, нонтронитовой глиной, красным шламом и другими добавками, совмещающими функции упрочнения сырых окатышей и офлюсования [1–15]. Однако эти технологии не нашли практического применения по разным причинам, в частности, из-за трудности эффективного совмещения этих двух функций. В последнее время на рынке флюсов появилось новое сырье — марганцовистый известняк, который эффективно используется в ПАО «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.

Таблица 1. Температуры размягчения-плавления и фильтруемость продуктов плавки неофлюсованных железорудных окатышей через коксовую насадку

Железорудные окатыши	Температура размягчения $T_р$, °С	Температура плавления $T_{пл}$,°С	Температурный интервал размягчения-плавления $T_{пл}$-$T_р$, °С	Фильтруемость продуктов плавки всего,%	Фильтруемость шлака,%
МГОК	990	1410	420	81,3	0,0
ЛГОК	1040	1430	390	73,9	0,0
КГОК	995	1212	217	70,9	0,0
СГОК	1030	1425	395	82,2	10,3

Проведена проверка влияния марганцовистого известняка на процесс производства и прочность сырых окатышей, изменение параметров обжига и прочность обожженных окатышей. Были определены высокотемпературные свойства неофлюсованных и офлюсованных окатышей из концентрата СГОК. Исследования проводили в лабораторных условиях с использованием дашсахлинского бентонита и марганцовистого известняка.

После сушки бентонит и марганцовистый известняк были измельчены до фракции 100% — 74 мкм. Производство сырых окатышей осуществлялось в лабораторном грануляторе диаметром 600 мм с частотой вращения 28 об/мин. Грануляцию шихты осуществляли при угле наклона гранулятора к его горизонтальной оси 470. Влажность концентрата составляла 9,0%. Смешивание шихты перед грануляцией производили вручную путем просеивания через сито с ячейкой 1 мм. Грануляцию шихты осуществляли в 2 этапа: сначала получали «зародыши» фр. 5–8 мм, на которые в дальнейшем накатывалась оставшаяся шихта. Для оценки отбирались окатыши фракций 10–12 мм и 12–15 мм. Для каждого состава подбирали оптимальные параметры окомкования — время и влажность. Масса окатываемого материала составляла 7,5 кг.

Были произведены окатыши следующих видов:

1. Неофлюсованные окатыши с бентонитом 0,7%;
2. Офлюсованные марганцовистым известняком 2% с бентонитом 0,35%;
3. Офлюсованные марганцовистым известняком 4% (без бентонита).

Для определения пластичности сырые окатыши сбрасывали с высоты 300 мм на твердую поверхность. Пластичность измеряли в количестве падений до деформации. Прочность определяли путем раздавливания под нагрузкой в граммах на окатыш.

Важным показателем качества сырых окатышей является их термостойкость (температура «шока»), то есть поведение при резком нагреве в условиях термообработки на обжиговой машине. В настоящее время нет стандарта по определению термостойкости окатышей, поэтому модифицировали методику, разработанную в МИСиС. Сырые окатыши в количестве 20 штук загружаются в нагревательную печь, предварительно разогретую до заданной температуры. Испытания проводили с фильтрацией воздуха через слой. Температуру, при которой окатыши трескаются и разрушаются, принимают за температуру «шока», при этом число разрушившихся окатышей должно быть не менее 50%. В связи с тем, что в интервале температур 500–800 °С все испытуемые окатыши сохранили свою форму и не разрушились, диапазон исследований расширили до 1000 °С.

После окомкования сырые окатыши обжигали в вертикальной нагревательной печи в специальной корзинке с фильтрацией нагретого воздуха через слой. Режим термообработки для всех видов окатышей был один (рисунок 1).

После термообработки и охлаждения обожженные окатыши испытывали на прочность при сжатии на гидравлическом прессе (ГОСТ 24765-81). Показатели качества неофлюсованных и офлюсованных марганцевым известняком окатышей приведены в таблице 2.

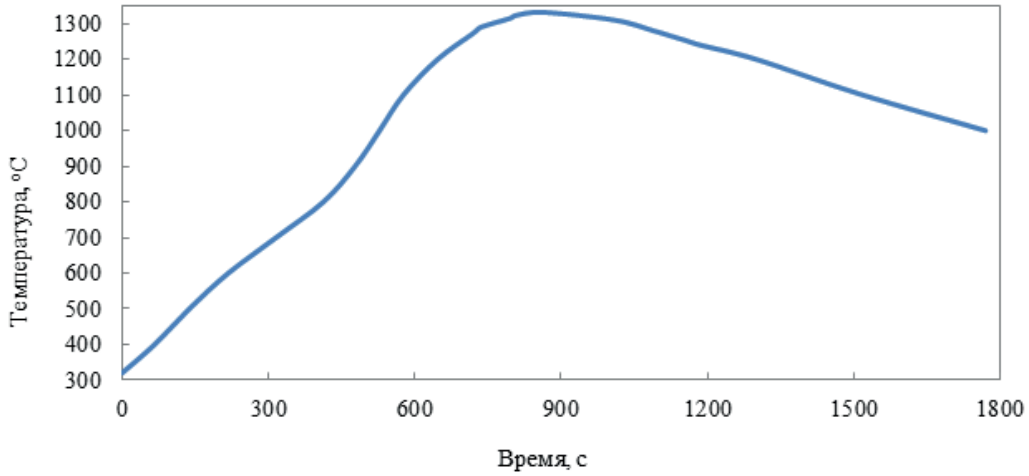


Рис. 1. Режим термообработки окатышей

Таблица 2. Показатели качества лабораторных окатышей

Показатели	Вид окатышей					
	С бентонитом 0,7%		С бентонитом 0,35% + Mn-известняк 2%		С Mn-известняком 4%, без бентонита	
Размер окатышей, мм	10-12	12-15	10-12	12-15	10-12	12-15
Влажность сырых окатышей,%	8,7		8,3		8,9	
Грансостав,%						
+15 мм	11,5		4,5		16,0	
+12–15 мм	10,8		26,1		31,6	
+10–12 мм	62,2		50,7		38,5	
–10 мм	24,3		18,7		13,9	
Пластичность (количество сбрасываний), раз	5,9	4,6	5,7	5,3	7,5	8,3
Прочность сырых окатышей, г/окатыш	466	560	757	695	627	639
Температура шока, °С	870		900		1000	
Обожженные окатыши						
Прочность на раздавливание, кг/окатыш	216,0	245,2	210,2	216,0	245,2	210,2

Влага, удерживаемая марганцовистым известняком, повышает пластичность окатышей и сопротивление динамическим нагрузкам. Прочность и пластичность сырых окатышей офлюсованных марганцовистым известняком выше, чем неофлюсованных.

Офлюсование окатышей марганцовистым известняком повышает температуру шока, что позволяет увеличить скорость нагрева и уменьшить разрушение окатышей при обжиге.

Марганцевый известняк, используемый в качестве связующего и флюса при производстве окатышей, изменяет протекание процессов тепло- и массообмена при термообработке. В процессе декарбонизации повышается пористость. Это способствует улучшению окисления магнетита на стадии нагрева и должно благоприятно отразиться на прочностных характеристиках обожженных окатышей.

Результаты показывают, что ввод в шихту марганцевого известняка в количестве 2% с бентонитом 0,35% не изменяет прочность окатышей диаметром 10–12 мм, а прочность окатышей диаметром 12–15 мм снижается. При вводе в количестве 4% повышается прочность обожженных окатышей диаметром 10–12 мм и немного снижается прочность окатышей диаметром 12–15 мм.

При обжиге окатышей в лабораторных условиях моделировали только температурный режим. Теплообмен был в основном радиационным. В реальных условиях термообработка окатышей осуществ-

ляется при конвективном теплообмене с кислородсодержащим газом-теплоносителем. Условием получения прочных окатышей является наиболее полное окисление магнетита до гематита при нагреве до 1000 °С [3]. Особенно важен такой режим для офлюсованных окатышей — высокая скорость нагрева снижает прочность. В данном случае высокая скорость нагрева и температура обжига, характерная для режима обжига неофлюсованных окатышей, привели к значительному увеличению количества жидких силикатных продуктов, инициировав процесс зонального обособления рудных частиц и появления отдельных монокристаллических зерен, закрытию пор и разрушению гематитового каркаса. Это привело к снижению прочности офлюсованных окатышей большого размера. В условиях термообработки окатышей кислородсодержащим газом-теплоносителем влияние высокой скорости нагрева должно быть меньше. В промышленных условиях при обжиге офлюсованных окатышей целесообразно изменить режим: увеличить стадию подогрева и уменьшить максимальную температуру обжига.

Для доменной плавки важным показателем качества окатышей является фильтруемость продуктов плавки через коксовую насадку. Моделирование процесса фильтрации продуктов плавки окатышей через коксовую насадку неофлюсованных и офлюсованных окатышей СГОК производили по специально разработанной методике [16]. Результаты исследований приведены в таблице 3.

Таблица 3. Показатели фильтруемости продуктов плавки окатышей через коксовую насадку

Окатыши	Показатели		
	Фильтруемость продуктов плавки всего,%	Фильтруемость шлака,%	Время фильтрации, мин
СГОК неофлюсованные	82,2	10,3	30
СГОК с Mn-известняком (2%)	83,6	35,1	18
СГОК с Mn-известняком (4%)	85,6	43,7	14

Через коксовую насадку практически не фильтруется шлаковая часть неофлюсованных окатышей СГОК. Основной причиной является высокая температура плавления пустой породы в окатышах.

Использование для офлюсования окатышей СГОК марганцовистого известняка значительно сокращает время фильтрации и повышает фильтруемость продуктов плавки в целом и шлака в частности. Особенно эффективно действует добавка в шихту окатышей 4% марганцовистого известняка.

Таким образом, доменная плавка неофлюсованных окатышей СГОК осложняется особым поведением шлаковой части, плохо фильтрующейся через коксовую насадку. Использование для офлюсования марганцовистого известняка в количестве 2–4% существенно повышает фильтруемость шлаковой части окатышей через коксовую насадку. Для доменных печей, работающих с удельной производительностью более 2,5 т/м^3·сут., фактор фильтруемости продуктов плавки является решающим при выборе состава окатышей.

ВЫВОДЫ

1. Офлюсование окатышей СГОК с использованием в качестве флюса марганцовистого известняка способствует повышению прочности сырых окатышей и не снижает прочность обожженных окатышей при существующем режиме термообработки. При обжиге офлюсованных окатышей целесообразно изменить режим: увеличить стадию подогрева и уменьшить максимальную температуру обжига. Изменение режима термообработки даст возможность снижения максимальной температуры обжига или повышения производительности обжиговой машины.
2. Офлюсованные марганцовистым известняком окатыши по сравнению с неофлюсованными имеют более высокую фильтруемость шлака через коксовую насадку.

Список литературы

1. Бережной Н.Н., Губин Г.В., Дрожилов Л.А. Окомкование тонкоизмельченных концентратов железных руд. М.: Недра, 1971. 176 с.

2. Савицкая Л.И. Влияние извести на процесс упрочнения и свойства окатышей. Автореф. дис. к.т.н., Москва, 1974. 22 с.
3. Копырин И.А., Борц Ю.М., Граур И.Ф. Производство окатышей различной основности. М.: Металлургия, 1975. 192 с.
4. Бережной Н.Н., Булычев В.В., Костин А.И. Производство железорудных окатышей. М.: Недра, 1977. 240 с.
5. Малышева Т.Я., Журавлев Ф.М., Чумак А.Д. и др. Механизм спекания и вещественный состав железорудных окатышей, офлюсованных доломитизированным известняком. Изв. АН СССР, Металлы, 1980. № 6. С. 3–10.
6. Сомова Т.Н., Балес А.А., Серебренников В.А. Мергель — флюсующая добавка в окомковании. Материалы 3 науч.-тех. конф.: «Молодые ученые — научно-техническому прогрессу в металлургии», Донецк, 1982, С. 11–14.
7. Червоненко А.П., Перепелицын А.И. Производство офлюсованных окатышей. Горный журнал, 1982. № 9, С. 25–27.
8. Мейерчак Ш. Производство окатышей. М.: Металлургия, 1982. 232 с.
9. Jiricek Vladimir. Zpusob vyroby zpevnenich sbalku. Авт. св. ЧССР № 178758, Опубл.15.05.79, МКИ С 22 В 1/14.
10. Pearson Douglas. The agglomeration of finely divided metalliferous materials. Англ. Пат. № 1574719. Опубл. 10.09.80, МКИ С 22 В 1/243.
11. Патент РФ №2031153. Способ получения офлюсованных окатышей. Опубл. 20.03.1995, МКИ С22В1/24.
12. А. с. СССР №988887. Способ получения окатышей. Опубл. БИ №2 1983, МКИ С 22 В 1/14.
13. А. с. СССР №692879. Способ получения офлюсованных железорудных окатышей. Опубл. 28.10.1979, С 22 В 1/24.
14. А. с. СССР №800200. Шихта для получения окатышей. Опубл. 30.01.1981, С 21 В 1/20.
15. Патент РФ № 2089629. Способ приготовления шихты для получения железорудных окатышей. Опубл. 10.09.1997, МКИ С22В1/242.
16. 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.

М.И. Стуков, А.Ю. Чернавин, В.А. Кобылев, Д.А. Чернавин, К.П. Ивашиненко, ООО «ПРОМИНТЕХ-НКА»

КОМПЛЕКС МЕТОДИК И ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ КОКСА И ШЛАКОВ В ЗОНЕ ПЛАВЛЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Решалась задача объединения существующих методик по исследованию высокотемпературных свойств железорудного сырья и кокса в единый технологический комплекс с получением новых показателей взаимодействия расплавов с коксом.

Методики призваны изучить свойства и поведение шихтовых железорудных материалов в зонах восстановления, вязко-пластичного состояния и плавления.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ КОМПОНЕНТОВ ШИХТЫ В ЗОНЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ПЛАВЛЕНИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ШИХТЫ ЧЕРЕЗ КОКСОВУЮ НАСАДКУ

В качестве базового оборудования принята вертикальная шахтная электропечь сопротивления с трубчатым углеродистым нагревателем (рисунок 1). Вертикальная шахтная электропечь сопротивления обеспечивает:

- восстановление железорудных компонентов доменной шихты при восстановительно-тепловой обработке;
- в процессе испытаний на CSR и CRI проплавку восстановленной доменной шихты на навеске из частично-газифицированного кокса в конструкции из трёх графитовых тиглей;
- получение чугуна и шлака соответствующего количества [1–3].

С целью восстановительно-тепловой обработки шихтовых материалов к эксперименту подготовка заключается в дроблении железорудного компонента с последующим выделением фракции 3÷5 мм и составлением смеси в соотношении 2:1 железорудного компонента с фракцией 3÷5 мм буроугольного полукокса.

Восстановительно-тепловая обработка загруженной в электропечь смеси моделирует зону восстановления. Проводится медленный нагрев смеси железорудного компонента и восстановителя от 20 °С до 980÷1020 °С.

Металлизованный продукт классифицируют методом рассева на две фракции: +1,5 мм и –1,5 мм.

Фракция –1,5 мм от общей массы металлизованного железорудного компонента принимается за показатель разрушаемости.

Степень восстановления определяется как отношение убыли массы железорудного компонента после восстановления к массе кислорода в оксидах железа до процесса восстановления, выраженное в процентах:

$$\eta_{восст} = \frac{M_{исх} - M_{мет}}{O_{Fe}} \times 100,$$

где: O_{Fe} — масса кислорода оксидов железорудного компонента кг,

$M_{исх}$ — масса исходного железорудного компонента, кг,

$M_{мет}$ — масса металлизованного железорудного компонента, кг.

Показатели восстановимости и разрушаемости характеризуют поведение железорудных материалов в изотермической зоне, их свойства при входе в высокотемпературную зону печи.

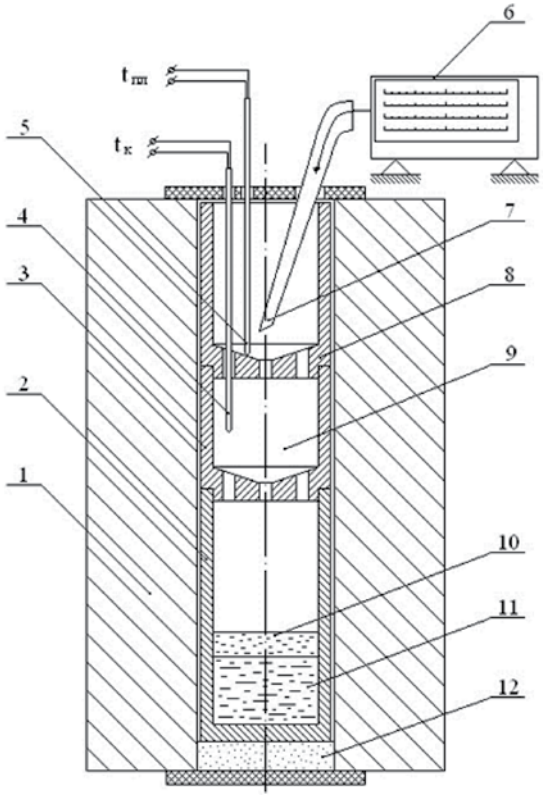


Рис. 1. Вертикальная шахтная электропечь сопротивления с трубчатым углеродистым нагревателем
1 — футеровка, 2 — глуходонный графитовый тигель для сбора продуктов плавки, 3 — графитовый тигель с перфорированным днищем, 4 — термопара в коксовой навеске, 5 — термопара в проплавляемом ЖРМ, 6 — контроллер массы порций ЖРМ, продолжительности периодов проплавки-фильтрации и кинетики процессов, 7 — лоток подачи порции ЖРМ в зону проплавки, 8 — верхний графитовый тигель для приёмки и проплавки порции ЖРМ, 9 — навеска кокса, 10 — шлак, 11 — металл, 12 — углеродистая подсыпка

Графитовые тигли (рисунок 1) изготавливают из типовых электродов. Реактор собирают из трёх стыковочных тиглей. В горловину нижнего глуходонного тигля вводится донная стыковочная ступень среднего тигля с перфорированным днищем. Во внутреннее пространство среднего тигля помещают навеску кокса, подвергнутого термоокислению (частичной газификации) в процессе испытаний на показатели CSR, CRI. В горловину среднего тигля вводится донная состыковочная ступень верхнего тигля с перфорированным днищем. Перед размещением в рабочем пространстве печи каждый из тиглей и коксовую насадку взвешивают. Собранную конструкцию тиглей с навеской кокса в пространстве среднего тигля помещают в рабочее пространство печи, разогретое до температуры 1350°С. Навеску железорудной части доменной шихты формируют из металлизованных компонентов в соответствии с фактическими соотношениями моделируемой доменной печи. Плавление железорудной части производят посредством загрузки её порциями в верхний тигель. После загрузки порция железорудного компонента прогревается, плавится и стекает через средний тигель с коксовой насадкой в нижний тигель. Жидкий расплав разделяется на чугун и шлак.

После охлаждения реактора осуществляется его разделение на составные тигли. Массу каждого тигля сопоставляют с исходной величиной. Прирост массы нижнего тигля соответствует количеству чугуна и шлака, профильтровавшихся через коксовую насадку. Увеличение массы среднего тигля является арифметической суммой двух величин: убыли массы кокса от взаимодействия с оксидами расплава и прироста массы от шлака и металла, попавших внутрь кокса и оставшихся на его поверхности и зависших в межкусковом пространстве.

Показатели «фильтруемость шлакового расплава» и «дренажная способность кокса» по отношению к шлаковому расплаву определяется, как отношение массы шлака в нижнем тигле ($m_{ш.н}$) к общему его количеству, выраженное в процентах:

$$f_{ш} = \frac{m_{шн}}{M_{шΣ}} \times 100,$$

где: $m_{ш.н}$ — масса шлака в нижнем тигле, кг;

$M_{ш.Σ}$ — общая масса шлака, кг.

Показатели «фильтруемость расплава общая» и «дренажная способность кокса» по отношению к расплаву общему определяется, как отношение массы всего расплава в нижнем тигле ($m_{ш.р}$) к общему его количеству, выраженное в процентах:

$$f_{р} = \frac{m_{ш.р}}{M_{рΣ}} \times 100,$$

где: $m_{р.н}$ — масса расплава в нижнем тигле, кг;

$M_{р.Σ}$ — общая масса расплава, кг.

Зависимость изменения показателей «фильтруемость шлакового расплава» и «фильтруемость расплава общая» от изменения состава и/или свойств проплавляемых железорудных шихт определяют в условиях одного кокса с неизменными и постоянными характеристиками. Зависимости характеризуют свойства железорудных материалов при плавлении и стекании расплава через коксовую насадку в горн.

Показатели «дренажная способность коксов» определяют в условиях одной железорудной шихты с неизменными и постоянными характеристиками. Зависимости используют для оценки разных видов кокса по характеру его взаимодействия с расплавами железорудного материала.

2. ЛАБОРАТОРНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРЮЧЕСТИ КУСКОВЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОТОКЕ ВЫСОКОНАГРЕТОГО ВОЗДУШНОГО ДУТЬЯ

Методика лабораторного определения горючести кусковых углеродных материалов в потоке воздушного дутья с высоким нагревом разработана под комплекс оборудования на базе шахтной электропечи сопротивления.

Предназначена для определения свойств углеродных образцов при исследовании процесса сжигания углеродных образцов технологических топлив.

Горючесть, как свойство материалов вступать в реакцию окисления с кислородом воздуха, оценивается коэффициентом использования кислорода потока дутья.

Для формирования коэффициента используют два показателя:

— стехиометрическое (теоретическое) количество воздуха для сжигания образца;

— фактическое (замеренное) количество воздуха для сжигания образца.

Отношение стехиометрического количества воздуха к фактическому его количеству при сжигании конкретного образца, выраженному в процентах, является численным отображением горючести в конкретных граничных условиях.

Горючесть определяют в условиях прогрева сжигаемого образца в интервале температур от 500 до 1500 °С с точностью ±10°С.

Температура потока воздушного дутья (21% об. кислорода при естественной влажности) устанавливается в диапазоне 120–1200 °С и выдерживается с точностью ±12°С. Масса сжигаемого образца, количество и скорость воздушного дутья соотнесены на достижение комплексного безразмерного показателя Re (показатель или число Рейнольдса) более 100 единиц. Это гарантирует надёжное течение процесса в области горения без рисков перехода в режим газификации:

— масса сжигаемого образца от 5,0 до 25 грамм;

— расход воздушного дутья (при нормальных условиях, т.е. 25 °С, давление атмосферное) на уровне 4,0 дм³/мин (четыре литра в минуту) с точностью ± 5% отн.;

— скорость истечения потока дутья на сжигаемый образец в пределах 10÷20 м/сек, для чего используют концентратор потока в виде керамического сопла Лаваля (рисунок 3).

Реактор для сжигания образцов кускового углеродного материала (технологического топлива) сформирован на базе электрической печи сопротивления с трубчатым угольным нагревателем (рисунок 2).

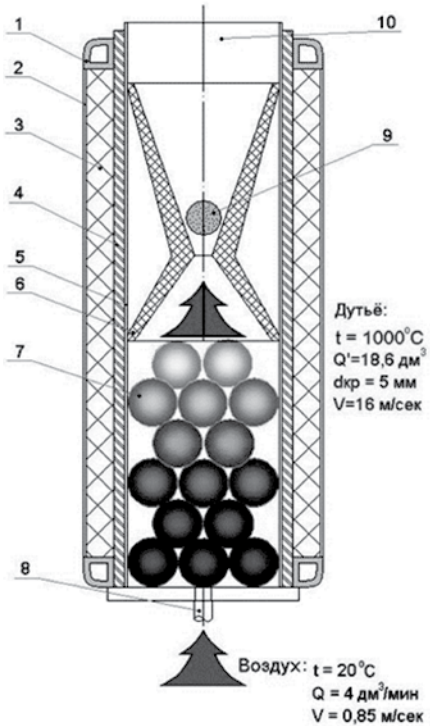


Рис. 2. Реактор для сжигания образцов кускового углеродного материала (технологического топлива):
1 — водоохлаждаемые фланцы; 2 — кожух печи; 3 — футеровка печи; 4 — графитовый нагреватель; 5 — керамическая обсадная труба; 6 — керамическое сопло Лаваля; 7 — керамическая насыпная насадка; 8 — воздушный коллектор; 9 — аэровитающий образец сжигаемого кокса; 10 — открытый колошник.

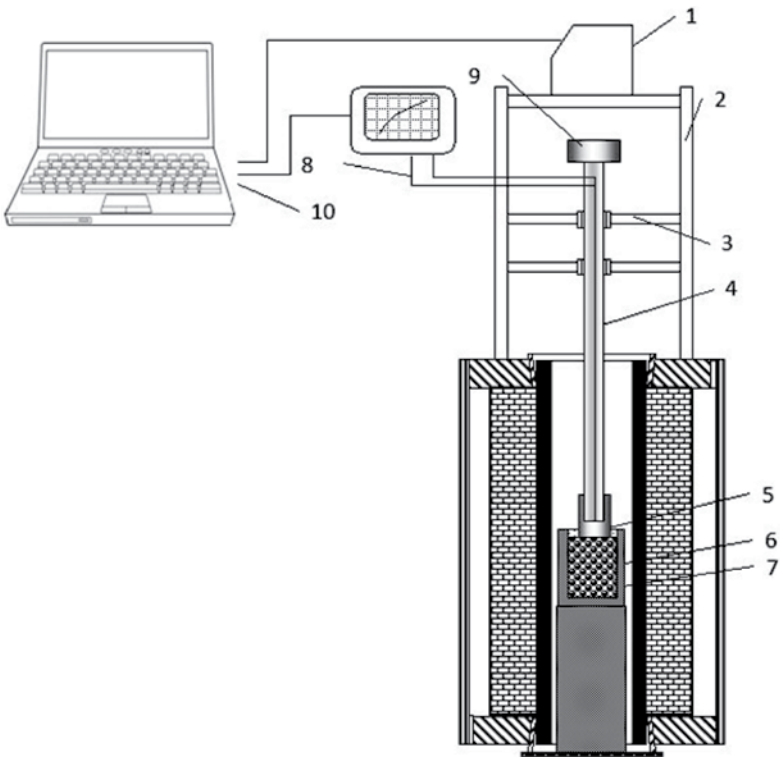


Рис. 3. Схема установки для определения температур размягчения и плавления
1 — лазерный измеритель, 2 — держатель лазерного измерителя, 3 — направляющие, 4 — корундизовая трубка, 5 — графитовый шток, 6 — испытуемый образец железорудного сырья, 7 — графитовый тигель, 8 — термопара, 9 — свинцовый груз, 10 — компьютер

В нагревателе размещаются в вертикальном состоянии керамические (корундовые) комплектующие реактора:

— обсадная труба, изолирующая поток дутья от угольного нагревателя;
— насыпная рекуперативная насадка, получающая тепло от трубчатого нагревателя и передающая тепло потоку дутья;
— сопло Лаваля над рекуперативной насадкой, концентрирующей поток дутья в узкую скоростную струю, направленную на сжигаемый образец;
— уплотнительные минерально-ватные набивки (каолиновая вата) для предотвращения потерь дутья в стыках обсадной трубы и внешних обводов сопла Лаваля.

Трубчатый угольный нагреватель обеспечивает прогрев реактора до температур 1200 °С и ее поддержание на заданном уровне с точностью задаваемой системой АСУ лабораторного комплекса. Нагрев угольного нагревателя осуществляется за счёт выделения тепловой энергии от протекающего тока.

Образец для сжигания должен иметь следующие параметры:

- масса 15 ± 3 грамма;
- точность измерения массы — 0,05 грамма;
- форма образца оптимальная — шар, допустимая — куб;
- целостность образца — единый кусок без видимых расколов и трещин.

Испытуемый материал помещают в верхний раструб сопла Лаваля с дальнейшим визуальным отслеживанием его прогрева. По достижении образцом поверхностного светоизлучения близкого к образующей сопла Лаваля приступают к режиму сжигания.

Режим сжигания активизируют включением в работу побудителя воздушного дутья, одновременно фиксируют время начала процесса. По результатам сжигания фиксируется масса компонентов в сжига-

емом образце, в том числе масса горючих веществ (углерод, сера и летучие углеводороды), количество воздушного дутья на полное сжигание (объём либо продолжительность подачи и минутный расход). Исходя из массы горючих компонентов, по любой известной методике рассчитывается стехиометрическая потребность в воздухе для окисления горючих компонентов в оксидное состояние (CO_2, SO_2, H_2O).

Фактически израсходованное количество воздуха на сжигание рассчитывается как произведение продолжительности периода подачи дутья на расход дутья:

$$V_{в.факт} = \Delta\tau \times Q_в,$$

где: $\Delta\tau$ — время продолжительности подачи воздуха, с;

$Q_в$ — расход воздуха в единицу времени, м^3/с.

Расчёт горючести производится, как коэффициент полезного использования кислорода (КПИК) сгорающим образцом, выраженном в процентах:

$$КПИК = V_{в.стех} : V_{в.факт},$$

где: $V_{в.стех}$ — стехиометрическая потребность в воздухе для окисления горючих компонентов в оксидное состояние, м^3.

В данной методике имеет место случай относительной размерности, поскольку отсчёт ведётся по отношению к величине «стехиометрического количества воздуха».

Показатель горючести кокса характеризует его поведение в фурменной зоне доменной печи при взаимодействии с нагретым воздушным дутьем.

3. ЛАБОРАТОРНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ КОМПОНЕНТОВ ШИХТЫ В ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНОЙ ЗОНЕ

Для определения параметров состояния железорудных материалов в зоне вязко-пластичного состояния разработана установка и методика на основе ГОСТ 26517–85 «Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения температуры начала размягчения и температурного интервала размягчения» [4].

Сущность метода заключается в нагреве предварительно восстановленной пробы испытываемого железорудного материала в инертном газе и определении температуры размягчения и конца плавления по величине погружения жесткого стержня в слой материала под действием внешнего давления. За температуру размягчения железорудного материала принята температура, при которой в процессе нагрева усадка слоя достигает 2%. Погружение штока в материал на 80% характеризует температуру начала плавления материала. Интервал размягчения-плавления (ТИРП) определяется как разность между температурой плавления и температурой размягчения (при усадке образца на 2%).

Для проведения испытания применяется следующая аппаратура:

— установка для проведения испытания (рисунок 3);
— тигли графитовые цилиндрической формы внутренним диаметром 30 мм, высотой 60 мм и толщиной стенки и дна 5 мм;
— сита с квадратными ячейками размером стороны 3 и 5 мм;
— баллоны с инертным газом.

Установка для проведения испытания состоит из следующих приборов:

— печь электронагревательная ВПУ-23-1 для нагрева пробы до температуры выше 1600 °С;
— камера цилиндрической формы внутренним диаметром 70 мм, изготовленная из графита;
— шток (трубка) из карборунда наружным диаметром 18–20 мм с графитовым наконечником наружным диаметром 16 мм и высотой 60 мм, полым внутри, с толщиной стенки и дна 4–5 мм;
— груз для создания давления штока на пробу 0,1 МПа;

— стойка с направляющими для штока и с площадкой для замера погружения штока в пробу посредством лазерного измерителя LS5;
— вольфрам-рениевая термопара и программный регулятор температуры ТЕРМОДАТ-19К5;
— система регулировки скорости подачи инертного газа.

Из предварительно восстановленной пробы железорудного материала крупностью 5+3 мм при 900–1000 °С на ~80% отбирают для испытания пробу достаточную для заполнения тигля. Затем пробу в тигле уплотняют до прекращения усадки. Высота уплотненного слоя пробы 50 ±1 мм.

Тигель с пробой помещают в нагревательную печь сопротивления, устанавливают на пробу материала шток с грузом и термопарой, закрывают верхнюю крышку камеры. Масса груза и штока обеспечивает удельное давление на испытуемый материал 0,1 МПа. После включения контрольно-измерительных и регулировочных приборов, системы подачи инертного газа и электронагревательной печи пробу нагревают до 800 °С. Лазерный измеритель LS5 устанавливают в нулевое положение, соответствующее началу испытания.

Испытание проводят при скорости нагрева пробы 10 град/мин, объемной скорости подачи инертного газа в нагревательную камеру 0,5 дм^3/мин, давлении штока на пробу 0,1 МПа. В процессе испытания фиксируют температуру пробы в момент смещения штока от нулевого положения вследствие погружения в пробу. Устанавливают температуру размягчения железорудного материала и температуру плавления. Чем выше температура размягчения и чем меньше температурный интервал вязко-пластичного состояния испытанного железорудного материала, тем в большей мере он может удовлетворять условиям доменной плавки.

Показатели вязкопластичных свойств железорудных материалов характеризуют расположение и протяженность зоны когезии и ее влияние на газодинамическое сопротивление в нижней части доменной печи.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный комплекс методик по исследованию свойств углеродных материалов (в т.ч. кокса) и железорудного сырья моделирует их поведение на различных горизонтах доменной печи: горизонт восстановления ЖРС, вязко-пластичная зона, горизонт плавления ЖРС и взаимодействие его с коксовой насадкой.

Комплекс методик позволяет изучать поведение шихтовых материалов внутри доменной печи на разных её горизонтах и улучшать эффективность доменной плавки, увеличивать производительность, снижать удельный расход топливных материалов.

Список литературы

1. 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.
2. Пузанов В.П., Нечкин Г.А., Птичников Г.А., Кобелев В.А., Чернавин А.Ю. Основы работы противоточной коксовой насадки доменной печи (сообщение 2). Сталь, 2012. №11. С. 2–8.
3. Нечкин Г.А., Чернавин Д.А., Ивашиненко К.П. Представление на соискание Премии «Молодые ученые» Международной промышленной выставки «МЕТАЛЛ-ЭКСПО». «Методика и комплекс оборудования для лабораторного моделирования процессов шлакового дренажа в доменной печи». 2013 г.
4. ГОСТ 26517-85. Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения температуры начала размягчения и температурного интервала размягчения.

Р.В. Петухов, Г.Ю. Витькина, А.Н. Дмитриев, ИМЕТ УрО РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИТАНОМАГНЕТИТОВОГО СЫРЬЯ (ВОССТАНОВИМОСТЬ, «ГОРЯЧАЯ» ПРОЧНОСТЬ, ИНТЕРВАЛ РАЗМЯГЧЕНИЯ) НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время АО «ЕВРАЗ НТМК» перерабатывает титаномагнетитовые окатыши, полученные из концентратов и руд Гусевогорского месторождения [1]. С целью восполнения выбывающих мощностей и увеличения объема добычи руды (55 млн т в год против 45 млн т в настоящее время) планируется ввести в эксплуатацию резервное Собственно-Качканарское месторождение (СКМ) [2, 3].

Титаномагнетиты представляют собой, главным образом, смесь двух минералов: ильменита $FeTiO_3$ и магнетита Fe_3O_4 с примесью ванадия и хрома. Химический состав титаномагнетитовых руд различных месторождений в зависимости от соотношения рудных и нерудных минералов изменяется в широких пределах. Поэтому помимо содержания целевых компонентов, они существенно отличаются по физико-химическим свойствам, и, следовательно, по условиям восстановления окатышей [4].

По элементному, минеральному составу и текстурно-структурным признакам руды указанных месторождений являются достаточно близкими. Содержание ильменита в рудах СКМ выше, чем в Гусевогорском месторождении. В то же время титаномагнетит СКМ характеризуется более крупными текстурными разновидностями [3, 5].

В условиях доменной печи восстанавливается и переходит в чугун 70–80% ванадия. Титан переходит в чугун в количестве 3–5%. Плавка титансодержащих руд всегда отличается трудностями, связанными с особенностями восстановления титана и образованием неплавких масс в горне печи. Вязкость шлака при температуре 1400–1500 °С с со-

держанием до 45% TiO_2 достаточно низкая [6]. В доменном шлаке с использованием титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения содержание TiO_2 составляет 9,5–10,5. Доменная плавка с таким содержанием диоксида титана не вызывает технологических проблем [6].

Поскольку с переходом на качканарские руды СКМ ожидается повышение содержания $FeTiO_3$ в железорудном сырье, то предстоит пересматривать технологические решения доменной плавки в печах объемом 2200 м^3 [7]. Для сохранения ровного хода доменных печей планируется пошаговое вовлечение в переработку титаномагнетитовых руд СКМ с постепенным повышением содержания диоксида титана в железорудном сырье [8, 9].

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В Институте металлургии УрО РАН разработана методика «Оценка влияния показателей качества железорудного сырья на технико-экономические показатели доменной плавки». Методика предусматривает [10]:

- получение в лабораторных условиях из исходного железорудного сырья окатышей;
- исследование химического и минералогического состава окатышей;
- определение металлургических характеристик и физико-химических свойств окатышей (прочность, пористость, восстановимость, температура размягчения и плавления);
- определение на основе комплекса двумерных математических моделей и балансовой логико-статистической модели доменного процесса технико-экономических показателей доменной плавки;
- проведение опытно-промышленных испытаний.

3. ВОССТАНОВИМОСТЬ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ

Восстановимость — величина, характеризующая способность железорудных материалов отдавать восстановительному газу кислород, соединенный с железом.

Исследование восстановимости проводится на установке в соответствии с требованиями ГОСТ 17212-84.

Методика определения показателя восстановимости заключается в определении степени восстановления по результатам химического анализа исходной и восстановленной пробы или потере массы кислорода при восстановлении после восстановления пробы оксидом углерода при заданных температурных условиях.

Восстановимость зависит от структуры, удельной поверхности пор и фазового состава.

С показателя восстановимости железорудного сырья изменяется производительность доменной печи, ее экономическая эффективность в результате изменения ровности схода шихты. Снижение показателя восстановимости железорудной части шихты доменной плавки увеличивает удельный расход доменного кокса.

4. ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Прочность после восстановления («горячая» прочность, индекс низкотемпературного разрушения, LTD) — способность сохранять механическую прочность после восстановления и поддерживать газодинамическое сопротивление слоя как можно меньше и дольше при высоких температурах для обеспечения ровного хода доменной печи.

Исследование прочности при низкотемпературном восстановлении проводится на установке в соответствии с требованиями ISO 13930-1998.

Сущность методики заключается в восстановлении пробы газообразным восстановителем во вращающемся барабане при заданном температурном режиме и последующем рассеве испытуемого материала на классы крупности, характеризующие его прочностные свойства.

Методика испытаний позволяет оценить прочность окатышей после их восстановления в условиях, схожих с верхней частью шахты доменной печи.

5. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ИНТЕРВАЛ РАЗМЯГЧЕНИЯ

Исследование температурного интервала размягчения проводится в соответствии с ГОСТ 26517-85.

Методика заключается в нагреве пробы испытуемого материала в инертном газе.

Определение температуры начала размягчения по началу погружения жесткого стрежня в пробу под действием внешнего давления.

Определение температурного интервала размягчения.

Температурный интервал размягчения железорудного сырья в значительной степени определяет форму, толщину и высоту расположения зоны когезии в доменной печи. Зона когезии характеризует показатель газодинамического сопротивления в нижней части доменной печи.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛАБОРАТОРНЫХ ОКАТЫШЕЙ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ДИОКСИДА ТИТАНА

Получены опытные образцы окатышей с различным содержанием в них TiO_2. Проведены лабораторные исследования с пошаговым вовлечением в переработку титаномагнетитовых руд с повышенным содержанием диоксида титана. В таблице 1 приведен химический состав исследуемых концентратов:

- ТМК — низкотитанистый концентрат (титаномагнетитовый концентрат Гусевогорского месторождения текущего производства);
- ВТК — высокотитанистый концентрат (концентрат Гусевогорского месторождения при раздельной добыче, аналог концентрата СКМ).

Выбран 20% шаг для соотношения указанных концентратов (таблица 2).

Таблица 1. Химический состав исследуемых концентратов, %

Концентрат	$Fe_{общ}$	FeO	CaO	SiO_2	TiO_2	V_2O_5
ТМК	62,40	28,03	1,28	4,19	2,67	0,58
ВТК	63,83	29,34	0,97	2,89	3,40	0,70

Таблица 2. Соотношение концентратов, %

Проба											
1/0		1/20		1/40		1/60		1/80		0/1	
ТМК	ВТК	ТМК	ВТК	ТМК	ВТК	ТМК	ВТК	ТМК	ВТК	ТМК	ВТК
100	0	80	20	60	40	40	60	20	80	0	100

Окатыши получили на лабораторном окомкователе, скорость вращения — 20 об/мин, угол наклона — 20 град.

В качестве связующего вещества — 0,7% бентонита.

Температура обжига — 1200 °С.

Химический состав обожженных окатышей приведен в таблице 3.

Таблица 3. Химический состав обожженных окатышей

Наименование материала	Содержание,%								
	$Fe_{общ}$	FeO	CaO	SiO_2	V_2O_5	TiO_2	MgO	MnO	Al_2O_3
1/0	59,5	1,30	1,35	4,60	0,497	2,58	2,98	0,221	2,26
1/20	60,04	2,98	1,12	4,20	0,536	2,75	2,85	0,224	2,34
1/40	60,97	3,80	1,08	3,89	0,570	2,91	2,71	0,234	2,45
1/60	60,60	3,11	0,943	3,40	0,607	3,11	2,57	0,231	2,55
1/80	60,85	2,86	0,838	2,80	0,637	3,27	2,38	0,260	2,63
0/1	60,35	3,17	0,873	2,49	0,665	3,44	2,24	0,260	2,70

Проведен рентгенофазовый анализ проб лабораторных окатышей.

Результаты приведены на рисунке 1а–е.

Окатыши представлены на дифрактограммах сложным фазовым составом.

Основной фазой является Fe_2O_3 (гематит — ромбоэдрическая сингония).

В малых количествах присутствует Fe_3O_4 (магнетит — кубическая сингония).

Также присутствует сложный диопсид $(Fe_{0,35}Al_{0,20}Mg_{0,44})Ca_{0,96}(Fe_{0,08}Si_{0,70}Al_{0,20})_2O_{6,12}$.

В таблице 4 указаны значения восстановимости исследуемых окатышей. Восстановимость исследуемых окатышей снижается при увеличении доли ВТК, но даже самое высокое значение (77,5%) не достигает расчетных и рекомендуемых значений для нормального хода доменного процесса (около 90%).

В таблице 5 приведены данные лабораторных исследований индекса $LTD_{+6,3}$ («горячей» прочности) окатышей.

Данные близкие к рекомендуемым значениям (90–95%).

Таблица 4. Восстановимость окатышей, %

Проба	Абсолютная степень восстановления (максимальная окисленность)	Фактическая
1/0	70,42	70,26
1/20	77,49	77,19
1/40	73,20	72,76
1/60	63,23	62,74
1/80	62,94	62,49
0/1	59,63	59,08

В таблице 6 приведены температуры начала и конца размягчения исследуемых окатышей.

Из результатов видно, что интервал размягчения от пробы 1/0 до 0/1 снижается (с 110–120 до 80 °С).

Таблица 5. Индекс низкотемпературного разрушения окатышей LTD

Проба	Масса после восстановления, г	Класс крупности после опыта, мм				LTD,%		
		+6,3	+3,15	+0,5	–0,5	+6,3	–3,15	–0,5
1/0	479,2	419,6	23,2	7,1	29,3	87,56	7,59	6,11
1/20	483,8	414,9	32,1	7,5	29,3	85,76	7,61	6,06
1/40	485,4	440,4	19,5	1,6	23,9	90,72	5,25	4,92
1/60	475,3	413,9	8,9	22,7	29,8	87,08	11,05	6,27
1/80	486,5	420,8	33,5	2,4	29,8	86,49	6,62	6,13
0/1	483,1	436,5	22,5	7,3	16,8	90,35	4,98	3,47

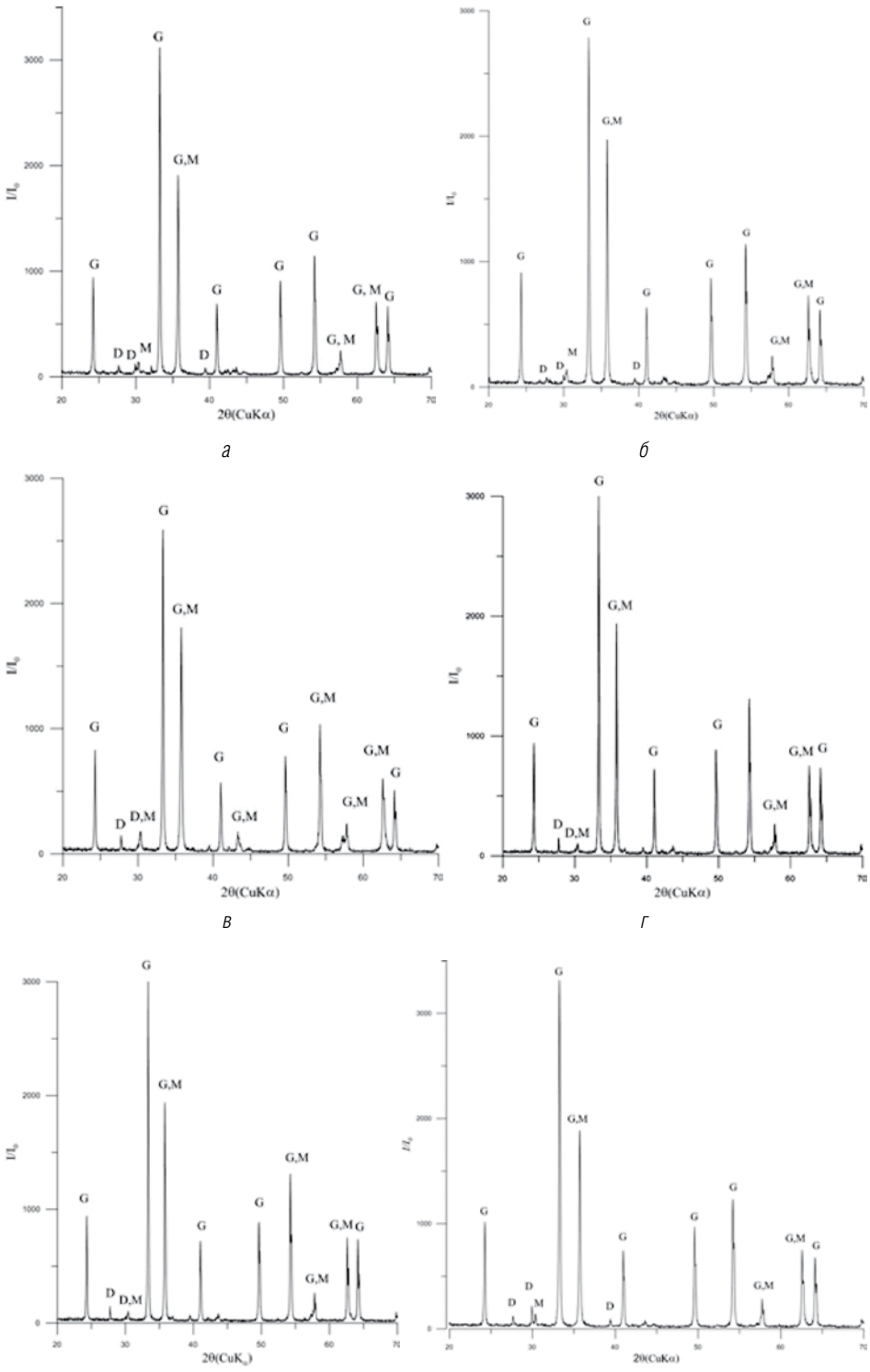


Рис. 1. Дифрактограммы исследуемых окатышей:
а — проба 1/0, б — проба 1/20, в — проба 1/40, г — проба 1/60, д — проба 1/80, е — проба 0/1. Символы: G — Fe_2O_3 (гематит); M — Fe_3O_4 (магнетит); D — $(Fe_{0,35}Al_{0,20}Mg_{0,44})Ca_{0,96}(Fe_{0,08}Si_{0,70}Al_{0,20})_2O_{6,12}$

Таблица 6. Температуры начала и конца размягчения исследуемых окатышей, °С

Проба	Начало	Конец
1/0	1200	1310
1/20	1200	1320
1/40	1210	1300
1/60	1220	1310
1/80	1230	1320
0/1	1220	1300

7. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИССЛЕДУЕМЫХ ОКАТЫШЕЙ

Для анализа использована балансовая логико-статистическая модель доменного процесса, основанная на использовании материальных и тепловых балансов, дополненных расчетами тепло- и массообмена, блоком учета неравномерности распределения газа по радиусу колошника и статистическими данными о влиянии различных факторов на показатели работы доменной печи. Модель разработана сотрудниками Института металлургии УрО РАН, проверена на адекватность и адаптирована [11].

С помощью модели проведены расчеты для условий работы ДП-6 АО «ЕВРАЗ НТМК».

Базовый период работы ДП-6: январь — март 2015 года. Вариант расчета основан на данных технических отчетов работы доменных печей (таблица 7).

Соответствие расчетного и базового вариантов говорит о полной адаптации математической модели к условиям работы ДП-6 АО «ЕВРАЗ НТМК».

Рассчитаны варианты использования окатышей и изучено влияние изменения их восстановимости, «горячей» прочности, температур начала и конца размягчения на технико-экономические показатели доменной плавки (таблица 8).

Таблица 7. Основные показатели работы ДП-6 АО «ЕВРАЗ НТМК» (июль 2015 г.)

Показатель	ДП № 6	
	Базовый вариант (расчетный)	Фактический вариант
Полезный объем печи, м^3	2200	2200
Производительность, т/сут	6894,6	6891,5
Общий расход руды, кг/т чуг	1637,1	1633,0
Среднее содержание Fe,%	57,3	57,4
Расход кокса, кг/т чуг	381,15	381,60
ПГ: количество, м^3/ т чуг	109,00	109,09
Дутье: температура, °С кислород,%	1177 30,5	1177 30,5
Колошниковый газ: температура, °С	—	93
Выход шлака, кг/т чуг	388,7	399,7
Основность шлака CaO/SiO_2	1,20	1,18

В модели стабилизирован состав чугуна по кремнию, титану, состав шлака по FeO и основности за счет изменения расхода шихтовых и флюсующих материалов.

Из таблицы 8 видно:

- расчетные варианты допустимы по содержанию TiO_2 в доменном шлаке (от 10 до 12%);
- очевидно повышение производительности и снижение расхода кокса при условии проведения компенсирующих мероприятий, например, использование в доменной шихте марганецсодержащих добавок;
- повышение основности шлаков с 1,2 до 1,3;
- повышение давления на колошнике печи с 283,7 до 324,2 кПа;
- снижение содержания кремния в чугунах с 0,01 до 0,005% [8].

Таблица 8. Результаты расчетного моделирования доменной плавки для ДП-6 АО «ЕВРАЗ НТМК»

Показатель	Ед. изм.	База (расчет)	1/0	1/20	1/40	1/60	1/80	0/1
Производительность печи	**т/сут**	**6894,6**	**6895,6**	**6921,6**	**7075,6**	**7032,2**	**7084,3**	**7136,0**
Общий расход ЖРМ: — агломерат КГОК — окатыши — железофлюс	кг/т чуг кг/т чуг кг/т чуг кг/т чуг	1694,42 604,23 879,58 139,11	1718,37 612,77 892,00 141,08	1709,6 609,64 887,45 140,36	1695,99 604,79 880,39 139,24	1700,25 606,31 882,6 139,59	1695,79 604,72 880,28 139,22	1705,05 608,02 885,09 139,98
Расход кокса	**кг/т чуг**	**381,15**	**388,20**	**385,04**	**382,65**	**384,37**	**381,26**	**380,25**
Среднее содержание Fe	%	57,3	56,47	56,75	57,23	57,04	57,17	56,86
Дутье: количество	$Нм^3$/т чуг	926,7	943,9	936,9	929,4	931,6	924,3	921,9
Колошниковый газ: выход теплотворная способность	$Нм^3$/т чуг кДж	1509,9 4259,3	1515,3 4274,1	1524,6 4271,6	1514,2 4280,6	1517,2 4299,6	1503,6 4288,9	1498,1 4294,6
Степень использования CO	%	46,3	45,8	46,0	45,9	45,6	45,7	45,6
Теоретическая температура горения	°C	2068,2	2072	2074,1	2069,8	2071	2066,8	2065,4
Состав чугуна: [Si] [S] [Mn] [Ti] [P] [C]	 % % % % % %	 0,094 0,020 0,300 0,180 0,049 4,660	 0,094 0,019 0,289 0,180 0,051 4,665	 0,094 0,017 0,279 0,180 0,05 4,665	 0,094 0,018 0,229 0,180 0,049 4,666	 0,094 0,019 0,234 0,180 0,049 4,666	 0,094 0,020 0,251 0,180 0,049 4667	 0,094 0,020 0,287 0,180 0,049 4,667
Состав шлака: (CaO) (MgO) (SiO_2) (TiO_2) (Al_2O_3) (MnO) (FeO) (S)	 % % % % % % % 	 34,00 14,1 28,36 10,00 14,18 0,55 0,61 0,71	 34,83 13,59 28,55 9,71 13,67 0,58 0,61 0,67	 34,36 11,51 28,17 10,23 13,05 0,48 0,61 0,68	 33,99 11,31 27,86 10,65 13,48 0,50 0,60 0,70	 33,34 11,25 27,33 11,35 13,95 0,49 0,61 0,58	 32,64 11,16 26,75 12,08 14,54 0,61 0,61 0,72	 31,97 11,28 26,20 12,06 15,67 0,63 0,61 0,72
Основность шлака CaO/SiO_2	—	1,20	1,22	1,22	1,20	1,2	1,22	1,22
Выход шлака	кг/т чуг.	388,7	418,6	408,4	391,8	391,7	380,8	382,9

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования по вовлечению в переработку титаномагнетитовых руд СКМ с постепенным повышением содержания диоксида титана в железорудном сырье. Получены окатыши с различным содержанием TiO2, проведен их химический и рентгенофазовый анализ, изучены восстановимость, «горячая» прочность и температуры начала и конца размягчения окатышей. С помощью балансовой логико-статистической модели проведены расчеты для условий работы ДП-6 АО «ЕВРАЗ НТМК».

Расчетные результаты (производительность печи, расход кокса, состав чугуна, шлака) позволяют считать возможным пошаговое вовлечение в переработку руд СКМ без ухудшения условий работы доменных печей.

Список литературы

1. Витькина, Г.Ю. Изучение металлургических свойств титаномагнетитового сырья / Г.Ю. Витькина, А.Н. Дмитриев, Р.В. Петухов, Ю.А. Чесноков // Бюллетень «Черная металлургия». — 2015. — № 12. — С. 26–29.
2. Селиванов, Д.А. Оценка группы сложности геологического строения месторождений Качканарской группы по количественным показателям / Д.А. Селиванов, Л.З. Быховский, С.А. Емельянов // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 1. — С. 59–64.
3. Селиванов, Д.А. Результаты комплексной геолого-экономической оценки месторождений Качканарской группы // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 3. — С. 46–52.
4. Мамедов, А.Н. Восстановление офлюсованных окатышей титаномагнетитовых концентратов песчаников природным газом с получением металлизованных окатышей / А.Н. Мамедов, Г.М. Самедзаде, А.М. Гасымова, У.Н. Шарифова, Т.А. Исаченко, И.Г. Шарифова, О.Ш. Абдулрагимова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2016. — № 2. — С. 174–177.
5. Петухов, Р.В. Металлургическая оценка руд и концентратов качканарского месторождения / Р.В. Петухов, А.Н. Дмитриев, С.В. Корнилков, А.Е. Пелевин, Г.Ю. Витькина, Ю.А. Чесноков // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2014), 26–29 марта, 2014. — Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 64–71.
6. Дмитриев, А.Н. Современное состояние, перспективы развития и освоения базы титансодержащих руд Урала / А.Н. Дмитриев // Бюллетень «Черная металлургия». — 2015. — № 12. — С. 36–40.
7. Дмитриев, А.Н. Физико-химические и теплофизические основы переработки титаномагнетитовых руд / А.Н. Дмитриев, В.Ю. Носков // Металлург. — 2017. — № 5. — С. 42–45.
8. Дмитриев, А.Н. Аналитическое исследование влияния качества титаномагнетитового сырья на показатели доменной плавки / А.Н. Дмитриев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 8. С. 609–615.
9. Дмитриев, А.Н. Подготовка к доменной плавке титаномагнетитовых концентратов с различным содержанием диоксида титана / А.Н. Дмитриев, Р.В. Петухов // Черная металлургия. 2017. № 12 (1416). С. 27–30.
10. Dmitriev, A.N. Methodical basis of investigation of influence of the iron ore materials and coke metallurgical characteristics on the blast furnace smelting efficiency / A.N. Dmitriev, G.Yu. Vitkina, Yu.A. Chesnokov // Advanced Materials Research. — 2013. — V. 602–604. — P. 365–375. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR. 602–604.365
11. Ченцов, А.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса / А.В. Ченцов, Ю.А. Чесноков, С.В. Шаврин // Екатеринбург: УрО РАН, 2003. — 163 с. ISBN 5-7691-1427-4.

В.И. Носенко, А.Н. Филатов,
ООО «Русское горно-химическое общество»
Г.А. Нечкин, В.А. Кобелев,
ОАО «Уральский институт металлов»

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНЕЗИАЛЬНОГО ФЛЮСА «ФЛЮМАГ М» В АГЛОДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Оксид магния в металлургии используется в качестве флюсующего компонента при производстве чугуна и стали для создания шлака с оптимальными металлургическими свойствами. Повышение содержания MgO в сталеплавильном шлаке в основном преследует цель сохранения магнезитовой футеровки [1]. При производстве чугуна в доменных печах оксид магния вводится с целью уменьшения вязкости доменного шлака и улучшения его десульфурирующей способности [2]. Оксид магния в доменную печь вводится в составе железорудного агломерата и в виде флюсующих добавок.

В качестве основного источника оксида магния при производстве железорудного агломерата используется доломит, иногда железорудные материалы с повышенным содержанием магнезии (например, ковдорский концентрат, сырой или обожженный бакальский сидерит), а также магнийсодержащие отходы производства — чаще всего конвертерный шлак.

Показатели агломерационного процесса и качество агломерата при использовании доломита и конвертерного шлака хуже, чем других магнезиальных флюсов [3].

Перспективный магнезиальный флюс — брусит представляет собой практически чистый гидрооксид магния $Mg(OH)_2$ и является «лучшим высокомагнезиальным минеральным сырьем в сравнении с другими природными минералами» [4].

Брусит в агломерационном производстве в РФ прежде никогда не использовался. За рубежом (Япония) используется при производстве железорудного агломерата. Общее годовое потребление брусита в металлургическом производстве Японии — 230000 тонн, из них в агломерационном процессе — 120000 тонн (компания Nippon Steel)

и доменном производстве — 110000 тонн (компания JFE). Технология использования брусита при производстве железорудного агломерата запатентована в Японии фирмой Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp [5, 6]. Брусит вводится в агломерационную шихту в виде флюсующей добавки в количестве 0,5–2,0% от массы шихты. Применение брусита по сравнению с другими магнийсодержащими материалами позволяет повысить прочность агломерата и производительность процесса. Брусит по сравнению с магнийсодержащими материалами содержит меньше оксидов SiO_2, CaO и Al_2O_3 и больше оксида магния. Обладает меньшими потерями при прокаливании. В процессе плавления и минералообразования уменьшается количество стекла в структуре агломерата. Повышается прочность агломерата и восстановимость, прочность при восстановлении. Для получения необходимого эффекта содержание оксида магния в брусите должно быть более 50%. Оптимальный гранулометрический состав брусита: содержание фракции < 0,25 мм — 20%; > 5 мм — 5%.

Основные параметры применения брусита и его эффективность получены в сырьевых условиях Японии, где гранулометрический состав аглошихты характеризуется невысоким содержанием тонких классов железорудных материалов. Железорудная часть шихты характеризуется высоким содержанием железа и низким содержанием пустой породы, что определяет невысокое содержание шлакообразующих оксидов и относительно низкий расход флюсов.

Условия подготовки аглошихты, химический и минералогический состав агломерата на аглофабриках РФ значительно отличаются от аглофабрик Японии [7]. Например, на заводе Nagoya содержание фракции <0,125 мм составляет всего 6–7%, а на аглофабрике ПАО «НЛМК» содержание фракции <0,125 мм составляет более 80%. В аглошихте ПАО «НЛМК» в качестве магнезиального флюса применяют доломит. Особенности минералообразования и последующего плавления агломерата в доменной печи по поведению оксида магния выявили негативный фактор: значительные колебания содержания MgO в доменном шлаке. Исследования в Японии также показывают нестабильное поведение оксида магния при плавлении в доменной печи при использовании в качестве флюса доломита. Применение брусита устраняет этот негативный фактор.

Оценку эффективности применения магнезиального флюса «Флюмаг М» производили при спекании типовой агломерационной шихты ПАО «НЛМК». Физические свойства (влажность, крупность) соответствовали качеству компонентов шихты агломерационного производства. В качестве твердого топлива использовали подготовленную коксовую мелочь ПАО «НЛМК». Известковый камень, доломит и «Флюмаг М» дробили до крупности 3,0 мм, известь — до крупности 5 мм. Расчет шихты производили для получения агломерата с основностью 1,8 при расходе извести в шихту 35 кг/т агломерата. Расход коксовой мелочи в опытах был постоянным. В первом опыте возврат готовили специально путем спекания расчетного состава шихты и дробления спека до крупности 0–5 мм. Количество возврата во всех опытах составляло 25% от массы шихты. Результаты спеканий приведены в таблице 1.

Таблица 1. Показатели спекания шихты ПАО «НЛМК» с магнезиальным флюсом «Флюмаг М»

Показатели	Опытные спекания				
	Базовое	Ф-1	Ф-2	Ф-3	Ф-4
Влажность шихты,%	8,8	8,2	8,4	8,5	8,2
Высота слоя шихты, мм	470	470	470	470	470
Вертикальная скорость спекания, мм/мин	13,82	17,41	21,36	15,67	16,55
Выход годного,%	86,6	84,0	80,8	83,8	89,1
Удельная производительность, т/м^2·ч	1,166	1,396	1,732	1,228	1,291
Прочность ГОСТ 15137-87:					
$Б_{+5\ мм}$,%	71,6	75,4	71,8	74,3	74,0
$Б_{-0,5\ мм}$,%	5,8	5,1	5,3	5,3	5,8

В опытах Ф-1 и Ф-2 была произведена полная замена доломита магнезиальным флюсом «Флюмаг М». В опыте Ф-1 расход твердого топлива соответствовал базовому спеканию, а в опыте Ф-2 расход твердого топлива снижен на 9 отн.%.

В опытах Ф-3 и Ф-4 половину доломита в шихте заменили флюсом «Флюмаг М». В опыте Ф-3 расход твердого топлива соответствовал базовому, в опыте Ф-4 был снижен на 4,8 отн.%.

Приведенные в таблице 1 результаты показывают, что полная замена доломита магнезиальным флюсом «Флюмаг М» приводит к увеличению вертикальной скорости спекания, удельной производительности на 19,7 отн.% и прочности агломерата на 5,3 отн.%. При снижении расхода твердого топлива на 10 отн.% прочность агломерата остается на базовом уровне, но существенно возрастает удельная производительность на 48,5 отн.%.

При замене половины доломита в шихте магнезиальным флюсом «Флюмаг М» удельная производительность возрастает на 5–10 отн.%. Прочность агломерата по сравнению с базовой шихтой повышается на 3,8 отн.%. Снижение расхода твердого топлива на 5 отн.% почти не влияет на показатели прочности. Несколько повышается удельная производительность.

Таким образом, частичная и полная замена в аглошихте доломита магнезиальным флюсом «Флюмаг М» приводит к повышению удельной производительности аглопроцесса на 10–20 отн.% и прочности агломерата на 3–5 отн.%.

Наряду с агломератом компонентом доменной шихты являются окатыши. В настоящее время в России производятся как неофлюсованные, так и офлюсованные окатыши. Офлюсование производится в основном известняком, а в ОАО «Карельский окатыш» наряду с известняком в качестве флюса используются магнезиальные отходы. В ходе промышленных испытаний по замене магнезиальных отходов магнезиальным флюсом «Флюмаг М» были получены положительные результаты.

Офлюсованные окатыши обладают более высокими механическими и металлургическими свойствами, и их применение повышает эффективность производства чугуна в доменных печах. Магнезиальные окатыши используются в доменной плавке для оптимизации состава шлака, повышения производительности и улучшения качества чугуна.

Проведенные в Уральском институте металлов исследования показали, что использование в доменных печах неофлюсованных окатышей приводит к загромождению коксовой насадки горна, снижению производительности и повышению расхода кокса. Офлюсование окатышей оксидом магния позволит улучшить их металлургические свойства и повысить технико-экономические показатели производства чугуна.

На кафедре СТИ НИТУ «МИСиС» были проведены лабораторные эксперименты по применению магнезиального флюса «Флюмаг М» на основе брусита для получения железорудных окатышей [8]. Приведена сравнительная характеристика окатышей, офлюсованных известняком и магнезиальным флюсом «Флюмаг М». Сырые окатыши с добавкой магнезиального флюса имеют более высокую прочность на сжатие по сравнению с окатышами с добавкой известняка. Прочность на удар и истирание обожженных окатышей с флюсом «Флюмаг М» выше, чем с известняком. Оптимальное содержании флюса «Флюмаг М» в шихте окатышей 2%.

При офлюсовании окатышей с вводом в шихту флюсующих материалов возникают проблемы, связанные с процессом окомкования, прочностью и пластичностью сырых окатышей. Показатель пластичности определяет поведение сырых окатышей при транспортировке, перегрузке на конвейере и загрузке на паллеты обжиговой машины. Влияние магнезиального флюса «Флюмаг М» на процесс получения и пластичность сырых окатышей исследовали на концентрате Стойленского ГОКа.

Производство сырых окатышей производили в лабораторном грануляторе диаметром 600 мм. Часть шихты (25–30%) загружали в гранулятор, увлажняли и производили зародыши диаметром 3–5 мм. Фракции –3 и +5 мм отсевали, а на зародыши накатывали шихту при распылении воды. Из произведенных окатышей отсевали фракцию +10–12 мм, в сыром виде окатыши испытывали на сбрасывание с высоты 300 мм (показатель пластичности) и на термостойкость — определение температуры шока. Для определения прочности обожженных окатышей их подвергали обжигу в муфельной печи при температуре 1300 °С.

Были произведены неофлюсованные окатыши с содержанием дашсалахлинского бентонита 0,7%, окатыши с вводом 1, 2, 3 и 4% магнезиального флюса «Флюмаг М» (без бентонита) и окатыши с вводом 2% магнезиального флюса «Флюмаг М» и 0,35% бентонита.

Для определения пластичности сырых окатышей они сбрасывались с высоты 30 см на твердую поверхность. Пластичность измерялась в количестве падений до разрушения. Результаты определения пластичности сырых окатышей приведены в таблице 2.

Результаты исследований показывают, что пластичность сырых офлюсованных магнезиальным флюсом «Флюмаг М» окатышей СГОК на уровне, а при больших расходах выше, чем у неофлюсованных окатышей на бентоните. Влага, удерживаемая бруситом, повышает пластичность окатышей и сопротивление динамическим нагрузкам.

Таблица 2. Результаты определения пластичности сырых окатышей

Окатыши	Содержание добавки в шихте,%	Пластичность, количество сбрасываний, раз
Неофлюсованные с бентонитом	0,7	2,9
Офлюсованные «Флюмаг М» без бентонита	1	3,9
	2	5,6
	3	4,1
	4	4,6
Офлюсованные «Флюмаг М» с 0,35% бентонита	2	3,5

Вторым важным показателем качества сырых окатышей является их термостойкость (температура «шока»), то есть поведение при резком нагреве в условиях термообработки на обжиговой машине.

В настоящее время нет стандарта по определению термостойкости окатышей, поэтому использовали методику, разработанную в НИТУ «МИСиС». По этой методике исследование термостойкости окатышей производится в диапазоне 400–800 °С. Влажные окатыши в количестве 5–7 штук загружаются в печь угольного сопротивления (печь Таммана), предварительно разогретую до заданной температуры. Температуру, при которой окатыши трескаются и разрушаются, принимают за температуру «шока», при этом число разрушившихся окатышей должно быть не менее 50%. Результаты исследования термостойкости окатышей приведены в таблице 3. В связи с тем, что в интервале температур 500–800 °С все испытуемые окатыши сохранили свою форму и не разрушились диапазон исследований расширили до 1000 °С.

Таблица 3. Результаты исследования термостойкости окатышей

Температура, °С	Неофлюсованные	Офлюсованные «Флюмаг М»			
		1%	2%	3%	4%
825	Без изменений	Без изменений	Без изменений	Без изменений	Без изменений
850	Трещины	Без изменений	Без изменений	Без изменений	Без изменений
875	Разрушение	Без изменений	Трещины	Трещины	Трещины
900		Трещины	Разрушение	Разрушение	Разрушение
925		Разрушение			

Неофлюсованные окатыши на бентонитовой связке разрушаются при температуре 875 °С, окатыши с 1% «Флюмаг М» разрушаются при 925 °С. Окатыши с 2, 3 и 4% «Флюмаг М» разрушаются при 900 °С. Высокая температура шока обеспечивает сохранение окатышей при интенсивном нагреве на обжиговой машине. Таким образом, исследования показали, что ввод в шихту окатышей «Флюмаг М» повышает температуру шока для окатышей с 875 до 900 °С.

После окомкования сырые окатыши обжигали в муфельной печи в воздушной атмосфере при температуре 1300 °С. После термообработки и охлаждения обожженные окатыши испытывали на прочность, на сжатие по ГОСТ 24765-81. Результаты определения прочности обожженных окатышей приведены в таблице 4.

Полученные результаты показывают, что прочность обожженных окатышей повышается с вводом в шихту «Флюмаг М» в пределах 1–3%. Снижение прочности по сравнению с неофлюсованными окатышами получено только при вводе в шихту 4% «Флюмаг М». Максимальное повышение прочности обожженных окатышей достигается при расходе в шихту 2% «Флюмаг М».

Таблица 4. Прочность обожженных окатышей по ГОСТ 24765-81

Окатыши	Содержание «Флюмаг М»,%	Прочность, кг/окат.
Неофлюсованные с бентонитом	0	198,0
Офлюсованные «Флюмаг М» без бентонита	1	221,5
	2	305,2
	3	191,0
	4	178,5
Офлюсованные «Флюмаг М» с 0,35% бентонита	2	297,2

ВЫВОДЫ

1. Магнезиальный флюс на основе брусита «Флюмаг М» является эффективным заменителем традиционного доломита в агломерационном производстве.
2. Частичная и полная замена в аглошихте доломита на основе брусита «Флюмаг М» (ПАО «НЛМК») приводит к повышению удельной производительности аглопроцесса на 10–20 отн.% и повышению прочности агломерата на 3–5 отн.%.
3. Офлюсование окатышей магнезиальным флюсом «Флюмаг М» позволяет вывести из шихты бентонит и повысить прочность сырых и обожженных окатышей.

Список литературы

1. Демидов К.Н., Борисова Т.В., Возчиков А.П., Терентьев Е.А., Марясев И.Г. Высокомагнезиальные флюсы для сталеплавильного производства. Екатеринбург: «Уральский рабочий», 2013. 280 с.
2. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С., Клемперт В.М. Металлургия чугуна. М:. Металлургия, 1989. 512 с.
3. Тлеугабулов Б.С. Влияние магнийсодержащих добавок на технико-экономические показатели аглодоменного производства. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Интенсификация металлургических процессов и повышение качества металлов и сплавов». Тула, 1990.
4. Сиваш В.Г., Перепелицын В.А., Митюшов Н.А. Плавленный периклаз. Екатеринбург: «Уральский рабочий», 2001. 584 с.
5. Патент Японии, № 2007-32096, «Method for manufacturing sintered ore using brucite», C22B 1/16, Nippon Steel.
6. Патент Японии № 5012138, 15.06.2012, Заявка № 2008-240109, C22B 1/16, (Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp.).
7. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Введение в технологии металлургического структурообразования. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 501 с.
8. Тимофеева А.С., Кожухов А.А., Носенко В.И., Филатов А.Н. Оценка флюса «Флюмаг М» на основе брусита в качестве флюсоупрочняющего компонента в производстве железорудных окатышей. Металлург, 2018. № 8. С.

Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, НИТУ «МИСиС»
А.Н. Шаповалов, НФ НИТУ «МИСиС»

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ УПРОЧНЕНИЯ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ АГЛОМЕРАТОВ НА ОСНОВЕ МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА СПЕКА

В мировой практике аглодоменного передела производство офлюсованных магнезиальных агломератов, зарекомендовавших себя как железорудное сырье, позволяющее корректировать содержание CaO и MgO в доменном шлаке, получило широкое распространение. Кроме того, сам процесс агломерации весьма гибок в управлении, т.к. позволяет получать из шихты одного и того же состава агломерат с разными металлургическими свойствами за счет изменения режима спекания и, соответственно, минералогического состава готового продукта. Однако изменение компонентного состава агломерационной шихты является наиболее простым способом формирования микроструктуры спека.

В настоящее время имеется большое число исследований, доказывающих, что увеличение в готовом агломерате простой основности CaO/SiO_2 (B_2) или содержания MgO оказывает положительное влияние на его прочностные показатели. При этом такой показатель, как суммарная основность $(CaO+MgO)/SiO_2$ (B_2), имеющий важное значение для доменного передела, в агломерационном практически не учитывается, поэтому спрогнозировать изменение свойств агломерата при разнонаправленном изменении содержания в шихте оксидов кальция и магния весьма затруднительно.

Авторы данной статьи провели исследование, посвященное данному вопросу, применительно к условиям работы агломерационного цеха АО «Уральская Сталь», где в качестве магнезиального компонента используется сидероплезит (бакальский сидерит). Условия проведения экспериментов для серии спеканий агломератов постоянной суммарной основности (B_3 или $(CaO+MgO)/SiO_2$) представлены в таблице 1.

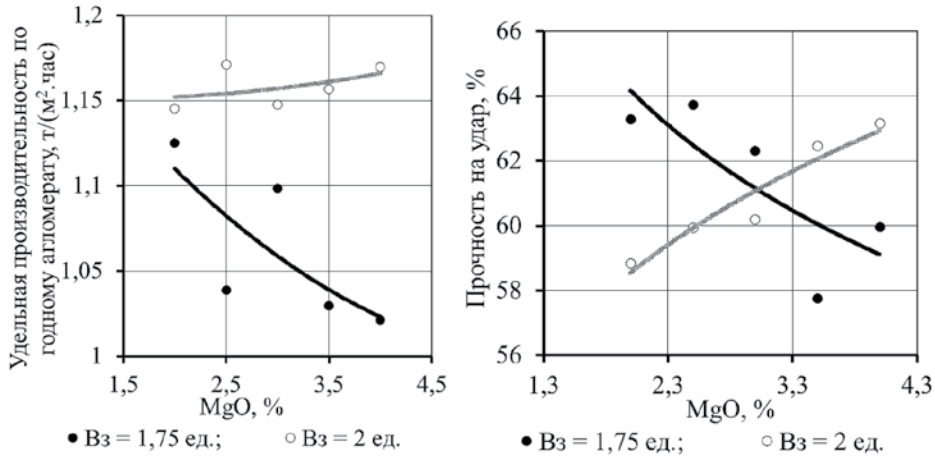
Таблица 1. Условия проведения опытных спеканий при разнонаправленном изменении содержания в шихте оксидов кальция и магния

Параметры	Значения параметров по опытам с расчетным содержанием MgO (%)*				
	2	2,5	3	3,5	4
Расчетное содержание железа в агломерате,%	52/51	51,5/50,5	51/50	50,5/49,5	50/49
Расчетная основность $(CaO+MgO)/SiO_2$, ед.	1,75/2,0				
Расчетная основность CaO/SiO_2, ед.	1,54/1,78	1,49/1,73	1,44/1,68	1,40/1,63	1,35/1,59
Содержание углерода,%	4,25/4,45	4,25/4,45	4,3/4,5	4,3/4,5	4,3/4,5

Примечание — в числителе значения для расчетной основности B_3 = 1,75; в знаменателе — 2,0

Использование сидероплезитов в качестве магнезиального компонента аглошихты оказывает непосредственное влияние на условия формирования макроструктуры спека. С увеличением MgO наблюдался рост потерь при прокаливании (п.п.п.) аглошихты и усадки аглоспека. При этом по сравнению с ростом п.п.п. увеличение усадки незначительно, что свидетельствует о повышении пористости агломерата. Это также подтверждалось ростом скорости спекания, уменьшением разрежения под слоем и внешним видом аглоспека. Кроме того, с увеличением магнезии отмечалось устойчивое снижение насыпного веса окомкованной аглошихты, обусловленное уменьшением доли тонкодисперсного концентрата в ней и улучшением условий окомкования [1, 2].

В результате экспериментально было установлено, что увеличение содержания MgO при одновременном снижении CaO/SiO_2 менее 1,5 негативно сказывается на удельной производительности по годному агломерату после сбрасывания (рисунок 1,а) и прочностных характеристиках спека (рисунок 2б). Причем для случая с основностью B_3 = 2,0 характерны более высокие показатели процесса спекания и качества агломерата, чем для B_3 = 1,75.



а) *б)*

Рис. 1. Влияние содержания MgO на удельную производительность по годному агломерату (а) и прочность спека (б) при разнонаправленном изменении содержания в шихте оксидов кальция и магния

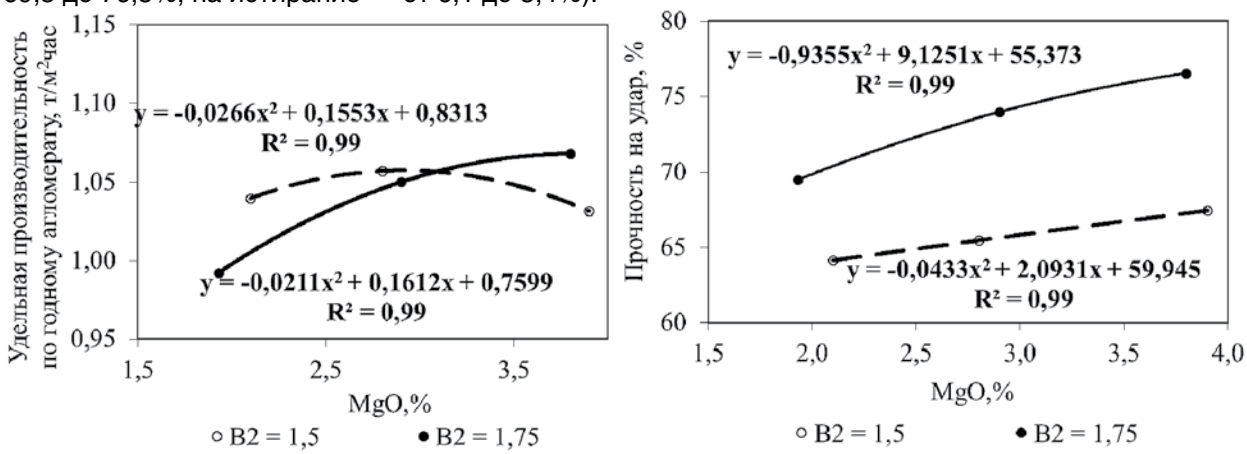
В результате было рекомендовано производство агломератов основностью по CaO/SiO_2 не менее 1,5 ед. при использовании в качестве магнезиальной добавки бакальских сидеритов.

С целью подтверждения правильности сделанных выводов была проведена еще одна серия спеканий агломерата с использованием бакальского сидерита, отличающаяся постоянством простой основности (CaO/SiO_2) при повышении содержания оксида магния в шихте. Условия проведения экспериментов сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Условия проведения экспериментов с использованием сидерита Бакальского рудоуправления (БРУ) при постоянной простой основности агломерата

Показатели	Значения по опытам					
	1БС	2БС	3БС	4БС	5БС	6БС
Расчетная основность агломерата CaO/SiO_2	1,5			1,75		
Расчетное содержание MgO в агломерате,%	2	3	4	2	3	4
Расчетное содержание Fe в агломерате,%	52	51	50	51	50	49

Вторая серия экспериментальных спеканий показала, что удельная производительность по годному (после сбрасывания) у агломератов основностью B_2 = 1,75 ед. возрастает на всем интервале роста содержания MgO, а в случае с основностью B_2 = 1,5 ед. такая зависимость не выявлена (рисунок 2а). Кроме того, вышеуказанные факторы оказывают положительное влияние на выход годного из спека и его прочностные характеристики (рисунок 2б), причем наилучшие показатели также, как и в первой серии спеканий, наблюдаются у агломератов основностью CaO/SiO_2 = 1,75 ед. (прочность на удар составляет от 69,5 до 76,5%, на истирание — от 6,1 до 5,4%).



а) *б)*

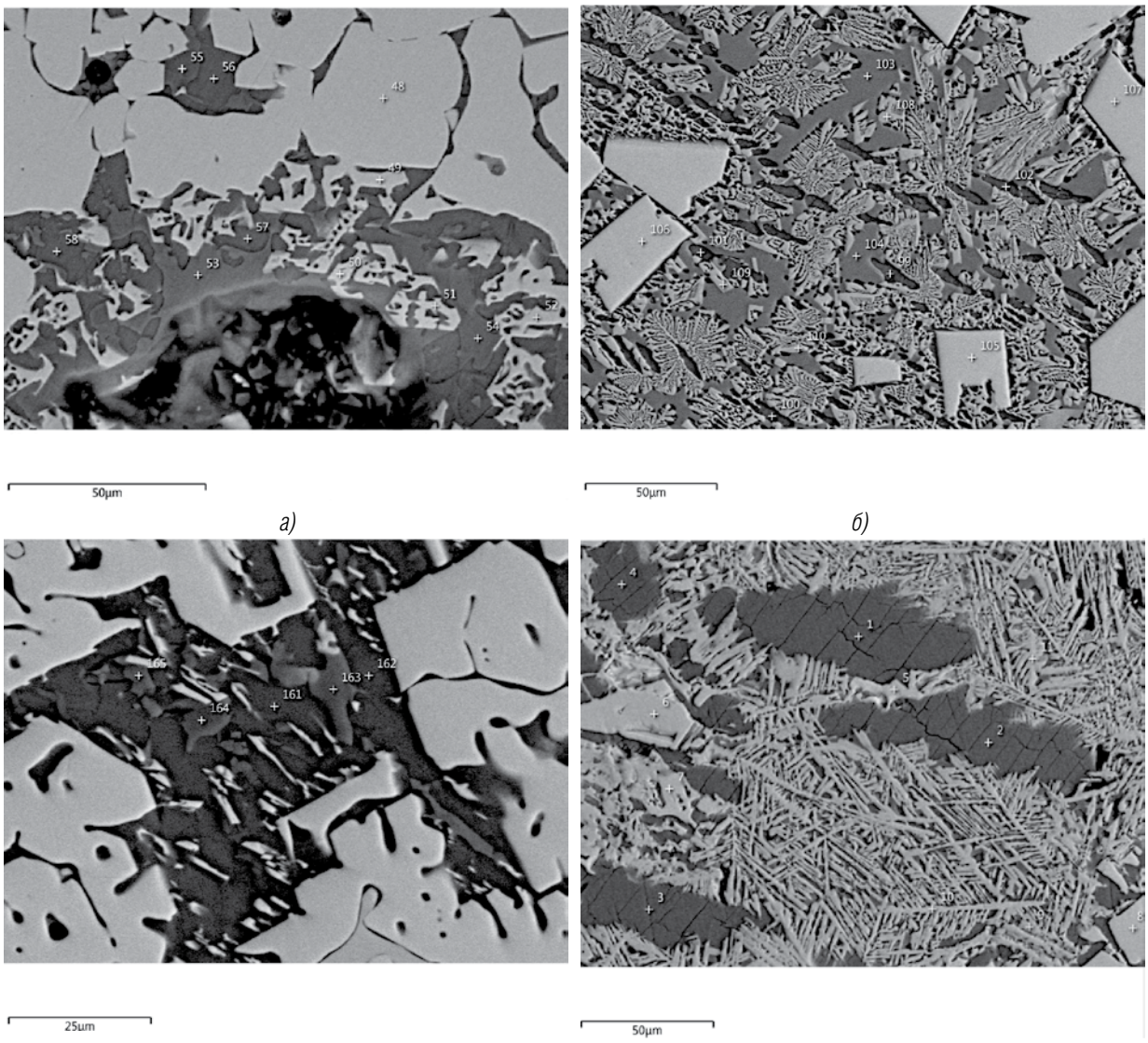
Рис. 2. Влияние содержания MgO на удельную производительность по годному агломерату (а) и прочность спека (б) при постоянстве содержания оксида кальция и повышении содержания магния

Анализ микроструктуры агломератов состава MgO = 2% и CaO/SiO_2 = 1,5 ед. позволил установить наличие в их структуре двухкальциевого силиката, являющегося основной причиной минимальной прочности таких агломератов (прочность на удар 64,1%, на истирание — 5,6%).

Предпосылкой для образования β-Ca_2SiO_4 в структуре агломерата является разделение силикатного расплава при кристаллизации на низко- и высокоосновный (рисунок 3,а).

Улучшение прочностных характеристик агломератов химического состава MgO = 2%, CaO/SiO_2 = 1,75 (рисунок 3в) происходит за счет того, что в них преобладающей связкой рудных зерен становится высокоосновная силикатная, при этом ее основность заметно ниже, чем в первом случае (рисунок 3а), и составляет CaO/SiO_2 = 1,3 ед., что позволяет предотвратить образование β-Ca_2SiO_4. С увеличением содержания MgO в высокоосновных агломератах происходит смена силикатной связки на более прочную — ферритную (рисунок 3г). То же характерно и для агломератов меньшей основности (CaO/SiO_2 = 1,5 ед.), но с большим содержанием магнезии (рисунок 3б).

Таким образом, исследование микроструктурных особенностей магнезиальных агломератов позволило определить причины изменения их прочностных показателей при изменении в них содержания CaO и MgO. Причем следует отметить, что максимально возможные показатели прочности (прочность на удар — 76,5%), характерные для агломератов состава MgO = 4%, CaO/SiO_2 = 1,75, не достигают 80%.



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 3. Микроструктура агломератов, полученных с использованием бакальских сидеритов:
а) MgO = 2% CaO/SiO_2 = 1,5; б) MgO = 4% CaO/SiO_2 = 1,5;
в) MgO = 2% CaO/SiO_2 = 1,75; г) MgO = 4% CaO/SiO_2 = 1,75.
Спектры: 48–52, 105–107, 155–158, 5–8, 12–17 — магнетит; 53–55, 103, 104, 163–165 — низкоосновная стеклофаза (CaO/SiO_2 менее 1,0 ед.); 57,58 — высокоосновная стеклофаза (CaO/SiO_2 = 1,7–1,8 ед.), склонная к кристаллизации в форме β-Ca_2SiO_4; 99–102, 1–4, 18 — двухкальциевый силикат β-Ca_2SiO_4; 108–110, 9–11 — феррит; 159–162 — высокоосновная стеклофаза (CaO/SiO_2 = 1,25–1,35 ед.).

В связи с этим возникает интерес к вопросу об использовании в качестве магнезиального компонента агломерационной шихты материала иного генезиса — силиката магния, т.к. в непосредственной близости от АО «Уральская Сталь» имеется Халиловское месторождение серпентинитомагнезитов ($Mg_6[Si_2O_5](OH)_8$) с содержанием в них MgO от 35 до 40%.

В зарубежной практике подготовки сырья к доменной плавке использование подобных материалов давно нашло свой отклик, в то время как на российских металлургических предприятиях подобная технология практически не практикуется по той причине, что высокое содержание кремния вызывает в агломератах заметное снижение содержания железа.

Условия проведения экспериментов с использованием серпентинитомагнезита представлены в таблице 3.

Таблица 3. Условия опытных спеканий с серпентинитомагнезитом (СМ)

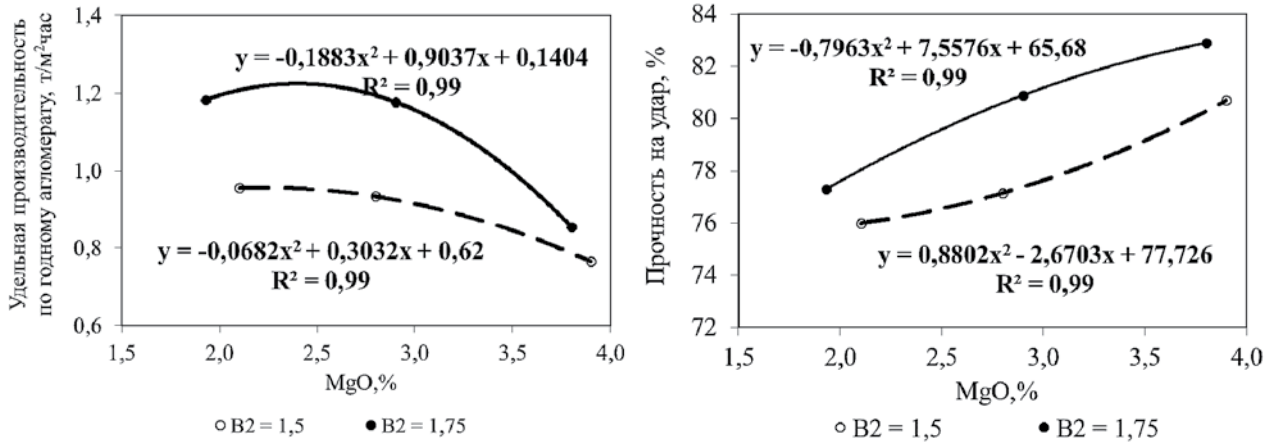
Показатели	Значения по опытам					
	1СМ	2СМ	3СМ	4СМ	5СМ	6СМ
Расчетная основность агломерата CaO/SiO_2	1,5			1,75		
Расчетное содержание MgO в агломерате,%	2	3	4	2	3	4
Расчетное содержание Fe в агломерате,%	52	51	50	51	50	49

Примечание: рабочая высота чаши с учетом постели

Крупность серпентинитомагнезита, используемого в экспериментах, составляла 0–1 мм, что способствовало улучшению условий окомкования шихты при увеличении его расхода, т.е. с увеличением содержания MgO в агломерате. Однако, несмотря на ожидаемое улучшение газодинамических условий спекания, с увеличением расхода серпентинитомагнезита наблюдается тенденция к снижению скорости спекания [3] и удельной производительности по годному агломерату (рисунок 4,а). Причем при основности CaO/SiO_2 = 1,75 данные показатели ниже, чем при CaO/SiO_2 = 1,5.

Выявленная динамика может объясняться особенностями поведения серпентинитомагнезита в процессе спекания. Тонкая фракция серпентинитомагнезита участвует в образовании гранул шихты, на что указывает рост среднего диаметра гранул с увеличением содержания магнийсодержащей добавки. В ходе высокоскоростного нагрева шихты, присущего агломерационному процессу, разложение серпентинитов происходит с выделением воды в виде пара, что вызывает резкое повышение давления внутри гранулы вплоть до ее разрушения. Разрушение гранул снижает газопроницаемость слоя во фронтальной части зоны горения и, соответственно, уменьшает скорость спекания, нивелируя тем самым улучшение газодинамических свойств шихты, полученных на стадии окомкования. Причем данный негативный эффект проявляется при добавлении серпентинитомагнезита свыше 3% в пересчете на MgO [3,4].

Оценивая барабанную прочность (рисунок 4б), следует отметить, что увеличение расхода серпентинитомагнезита благоприятно сказывается на свойствах готового агломерата (для агломератов основности 1,5 ед. прочность на удар изменяется от 76,0 до 80,7%, на истирание — от 5,3 до 3,9%; для основности 1,75 соответственно: от 77,3 до 82,9% и от 5,4 до 4,7%).



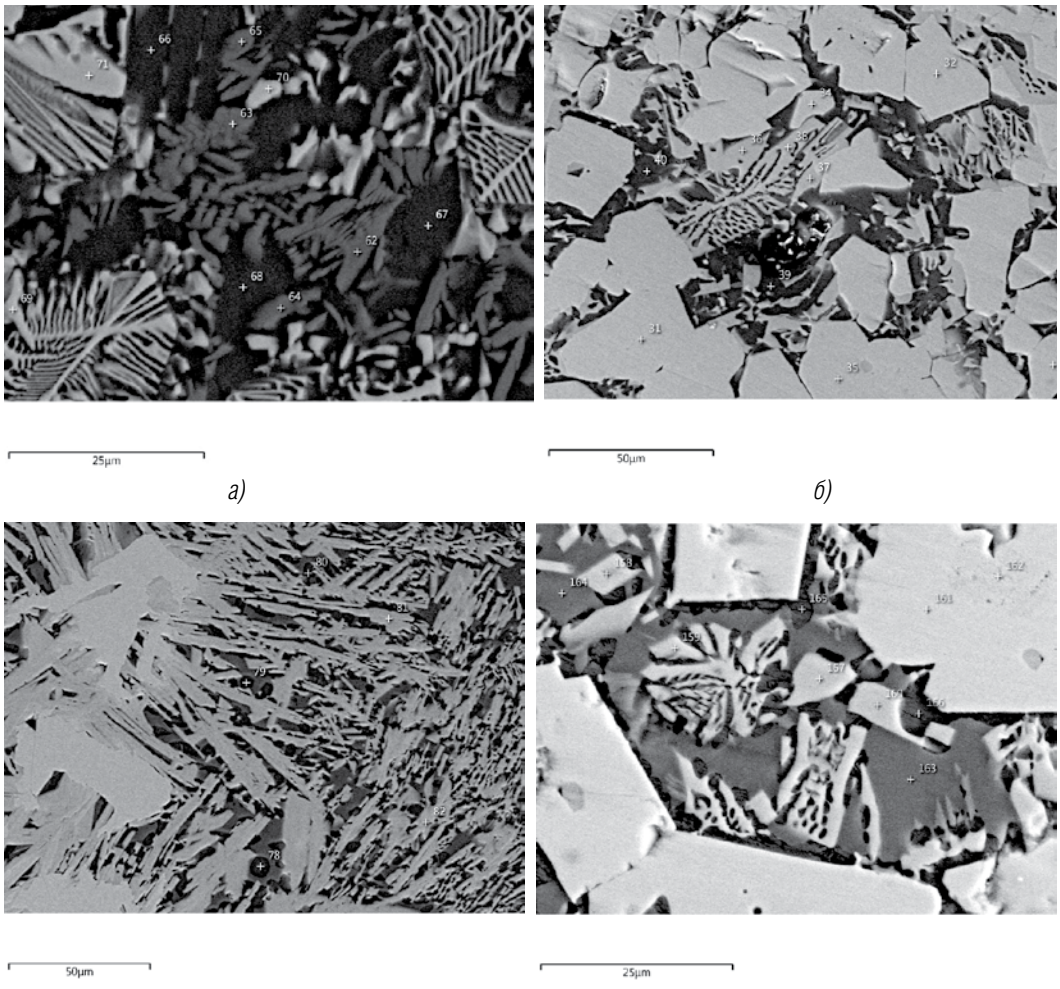
а) *б)*

Рис. 4. Влияние содержания MgO на удельную производительность по годному агломерату (а) и прочность спека (б) при использовании серпентинитомагнезита в качестве магнезиальной добавки

Причины заметного улучшения прочностных характеристик готового агломерата устанавливались на основе анализа их микроструктурных особенностей (рисунок 5).

Так, в агломератах состава «провальной» прочности (MgO = 2%, B_2 = 1,5) вместо образования двухкальциевого силиката большее распространение получают процессы кристаллизации твердых растворов мелилита в матрице силикатного расплава ранкинитового состава (рисунок 5а).

Дальнейшее увеличение содержания как MgO, так и CaO в агломерате ведет к постепенной смене силикатной связки на более прочную — ферритную. Причем увеличение содержания MgO в агломерате до 4% при любой основности способствует формированию ферритов компактного «магнетитоподобного» строения (спектры 157–160) (рисунок 6б-г). Двухкальциевый силикат в таких агломератах по-прежнему присутствует, однако его негативное влияние устраняется, т.к. мелкозернистая структура рудных зерен и ферриты выполняют роль барьеров, сдерживающих распространение трещин.



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 5. Микроструктура агломератов, полученных с использованием серпентинитомагнезита:
а) MgO = 2% CaO/SiO_2 = 1,5; б) MgO = 4% CaO/SiO_2 = 1,5; в) MgO = 2% CaO/SiO_2 = 1,75; г) MgO = 4% CaO/SiO_2 = 1,75.
Спектры: 47–53, 69–71, 31–35, 161, 162 — магнетит; 54, 163, 164 — низкоосновная стеклофаза (CaO/SiO_2 менее 1,0 ед.); 55, 66–68, 39–40 — стеклофаза ранкинитового состава; 62–65 –меллилит; 36–38, 81, 82, 157–160 — феррит; 78–80, 165–166 — двухкальциевый силикат β-Ca_2SiO_4

Идея разработки комбинированного магнезиального флюса [5], одним из компонентов которого является серпентинитомагнезит, основана на результатах термогравиметрического анализа, представ-

ленных в работах [7,8]. Совпадение температурных интервалов диссоциации карбонатов сидерита и образования форстерита в серпентинитомагнезите позволило сделать вывод о возможной компенсации затрат тепла при их совместном нагреве. В результате было принято решение рассмотреть возможность использования в агломерационном процессе 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 (таблица 4) химический состав готового агломерата принимался «базовый» (2% MgO и CaO/SiO_2 = 1,5), т.к. экспериментально было установлено, что агломераты такого состава отличаются минимальными показателями прочности.

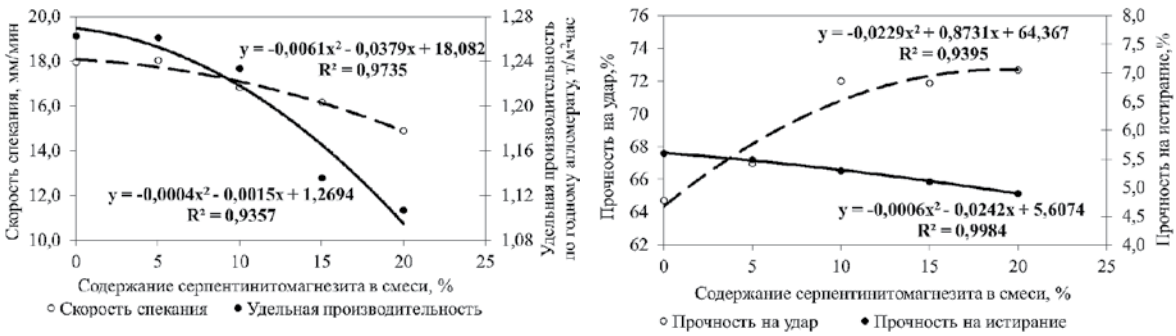
Содержание серпентинитомагнезита в магнезиальной смеси изменялось от 0 до 20% с шагом 5%.

Таблица 4. Условия проведения экспериментов с комбинированным магнезиальным флюсом

Параметры	Значения по опытам[1]			
	СМ-5	СМ-10	СМ-15	СМ-20
MgO в агломерате,%	2,0			
CaO/SiO_2, ед.	1,5			
Fe в агломерате,%	52,0			
Содержание серпентинитомагнезита в смеси,%	5	10	15	20

Зависимости скорости спекания и удельной производительности по годному агломерату от состава смеси (рисунок 6а) показывают, что увеличение в них доли магнезиального материала на основе силиката магния ведет к монотонному снижению рассматриваемых показателей. Также было установлено, 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 интервале 10–15%.

Результаты барабанных испытаний исследуемых агломератов (рисунок 6б) 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.



а) *б)*

Рис. 6. Показатели процесса спекания и прочности агломерата при использовании комбинированного флюса с разным содержанием серпентинитомагнезита в нем

В результате был сделан вывод, что замена части бакальского сидерита серпентинитомагнезитом в пределах 5–10% позволяет существенно повысить выход годного агломерата и его прочностные показатели при незначительном снижении скорости спекания и удельной производительности.

Выявление микроструктурных особенностей готового агломерата показало, что применение серпентинитомагнезита в составе комбинированного флюса с бакальским сидеритом позволяет использовать его способность к преобразованию гетерогенного расплава, характерного для микроструктуры «сиде-

ритовых» агломератов, в гомогенный расплав ранкинитового состава, кристаллизация которого сопровождается выпадением кристаллов мелилита (рисунок 7), выполняющего роль носителя прочности при отсутствии ферритов.

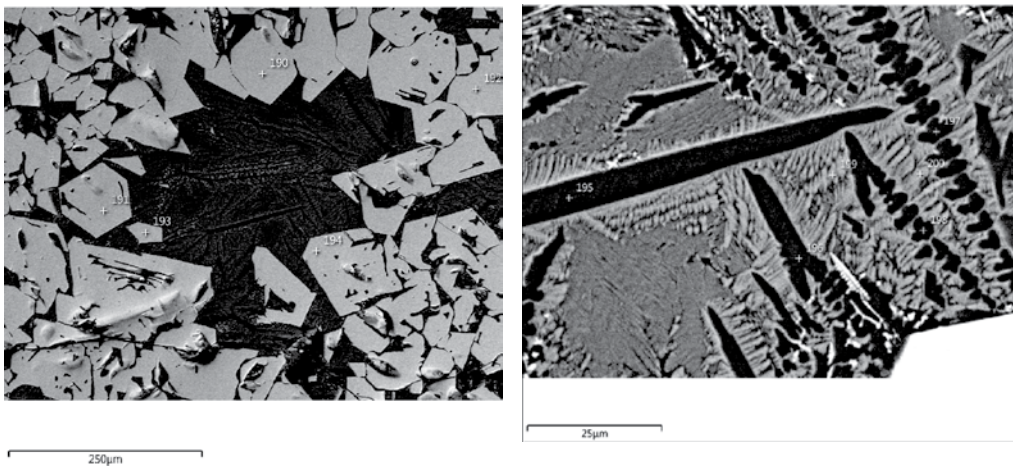


Рис. 7. Микроструктура агломератов, полученных с использованием комбинированного флюса СМ-10: Спектры: 190–194 — магнетит; 195–198 — стеклофаза ранкинитового состава; 199, 200 — мелилит

Таким образом, проведенное исследование показало, что минералогия готового агломерата во многом определяет его прочностные характеристики, соответственно, анализу микроструктурных особенностей спека следует уделять достаточное внимание при развитии методов его упрочнения.

Список литературы

1. Овчинникова Е.В., Горбунов В.Б., Шаповалов А.Н. Эффективность применения бакальских сидеритов при производстве магнезиального агломерата в условиях ОАО «Уральская Сталь» // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования, 2015. — Т.1. — № 1. — С. 133–137.
2. Овчинникова Е.В., Шаповалов А.Н., Горбунов В.Б. Особенности поведения MgO в процессе спекания агломератов с использованием бакальских сидеритов // Черная металлургия, 2016. — № 11 (1403). — с. 30–34.
3. Овчинникова Е.В. Экспериментальные исследования магнезиальных агломератов с использованием флюса на основе силиката магния / Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, А.Н. Шаповалов, Н.А. Майстренко, И.С. Берсенев // Сталь, 2018. — № 1. С. 2–5.
4. E.V. Ovchinnikova. Magnesia Sinter with Flux Based on Magnesium Silicate / V.B. Gorbunov, A.N. Shapovalov, N.A. Maistrenko, and I.S. Bersenev // Steel in Translation, 2018 — Vol. 48. — No. 1. — pp. 34–38.
5. Овчинникова Е.В., Горбунов В.Б., Шаповалов А.Н. Новый подход к использованию магнезиальных добавок // Металлургия чугуна — вызовы XXI века. Труды VIII Международного конгресса доменщиков. — М.: Издательский дом «Кодекс», 2017. — с. 465–470.
6. Овчинникова Е.В. Экспериментальные исследования магнезиальных агломератов с использованием флюса на основе силиката магния / Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, А.Н. Шаповалов, Н.А. Майстренко, И.С. Берсенев // Сталь, 2018. — № 1. С. 2–5.
7. Овчинникова Е.В. Применение термического анализа для оценки поведения компонентов аглошихты / Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, А.Н. Шаповалов, М.В. Потапова // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки, 2016. — № 15. — с. 46–52.
8. Овчинникова Е.В. Сравнительный анализ поведения магнийсодержащих материалов Южного Урала при температурах агломерационного процесса / Е.В. Овчинникова, В.Б. Горбунов, А.Н. Шаповалов, С.А. Писарев, Н.М. Дуров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2016. — Т. 59. — № 11. — С. 814–820.

В.В. Темников, АО «ЕВРАЗ НТМК»

УТИЛИЗАЦИЯ ШЛАКОВ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ В АГЛОПРОИЗВОДСТВЕ

В связи с широким распространением в металлургической отрасли внепечной обработки стали с использованием высококальциевых (содержание CaO до 60%) рафинировочных шлаков обострились экологические проблемы, связанные с хранением подобных шлаков [2]. Выполнивший свои металлургические функции ковшевой шлак после слива из ковша и затвердевания претерпевает так называемый силикатный распад.

Ежегодно в АО «ЕВРАЗ НТМК» образуется более 90 тысяч тонн шлака внепечной обработки стали (ВОС) с установки «ковш — печь» (УКП). Шлак ВОС не находит рынков сбыта и временно складируется (рисунок 1, 2). Около 80% частиц распавшегося шлака имеют размер зерна менее 30 мкм. Эти частицы легко аэрируются, разносятся ветром на большие расстояния, загрязняют почву, растворяются в грунтовых, осадочных и сточных водах. При совместном складировании с конверторными шлаками они их загрязняют и усложняют процесс переработки на скрап, металлопродукт и щебень.

В условиях АО «ЕВРАЗ НТМК» рассматривается утилизация шлака ВОС по двум направлениям:

1. Без предварительной подготовки шлака ВОС. Агломерационное производство. В качестве флюса при производстве агломерата.
2. Стабилизация структуры шлака ВОС с последующим дроблением и сортировкой.
   Цементная промышленность. В качестве добавки при производстве цемента.
   Сталеплавильное производство. В качестве извести.
   Строительство. В качестве щебня.

Для предварительной оценки эффективности работы по указанным направлениям был выполнен и проанализирован фазовый состав шлаков ВОС АО «ЕВРАЗ НТМК» (таблица 1).

Рис. 1

Рис. 2

Таблица 1

Материал	Содержание фаз, масс. %					
	$Ca_{12}A_{14}O_{33}$	β-Ca_2SiO_4	γ-Ca_2SiO_4	Ca_3SiO_5	CaF_2	MgO
Шлак УКП	21,39	45,15	16,10	9,03	5,27	3,06
Шлак вакууматора	30,89	4,98	39,66	16,75	3,86	3,86

Из представленных данным видно, что шлаки ВОС содержат значительное количество фаз [1], обладающих вяжущими свойствами. Это майенит ($Ca_{12}A_{14}O_{33}$), ларнит (β-Ca_2SiO_4), алит (Ca_3SiO_5). Наличие этих фаз является важным технологическим качеством шлака ВОС и должно использоваться при проработке вопросов применения шлака ВОС по обоим направлениям.

Шлак ВОС при смешивании и окомковании агломерационной шихты при взаимодействии с влагой выступает в роли связующего материала. При агломерационном процессе повышается прочность горячего агломерата. При замене в аглошихте сырого известняка на шлаки ВОС уменьшится необходимость разлагать $CaCO_3$. Это приведет к снижению удельного расхода топлива на агломерацию и, соответственно, уменьшится содержание серы в агломерате, снизятся затраты на агломерацию.

По утвержденной совместной программе (АО «ВРАЗ НТМК» — ОАО «ВГОК») провели лабораторные спекания и опытно-промышленные испытания железофлюса, произведенного с привлечением в аглошихту шлака ВОС с использованием его в доменном цехе АО «ЕВРАЗ НТМК». Шлак участка ВОС АО «ЕВРАЗ НТМК» привлекался в шихту железофлюса 22 августа 2018 г. Химический состав шлака приведён в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав шлака ВОС, %

Период	Fe	CaO	SiO_2	MgO	ппп	V_2O_5	Mn	S
Август	15,0	45,3	13,4	6,8	1,8	0,04	0,8	0,26

Подача в шихту осуществлялась по цепочке подготовки известняка, дозировка в шихту — в чистом виде. В процессе проведения работы было снижено количество шлака ВОС из-за наличия крупных включений металла фракции до 350 мм в шлаке. Наличие данной фракции могло привести к аварийной остановке молотковой дробилки.

Опытный период характеризовался частичной заменой известняка шлаком ВОС. В таблице 3 приведены результаты опытно-промышленных испытаний.

Всего было произведено 1216 тонны опытного железофлюса.

На основании проведенных опытно-промышленных спеканий железофлюса со шлаком ВОС получено, что ввод в состав шихты шлака ВОС положительно влияет на производительность агломашин и не снижает прочность агломерата. Удельная производительность агломашин увеличилась на 4,3%; Б +5 мм — увеличение на 0,3% абс., показатели Б –0,5 мм и содержание фр. –5 мм остались на прежнем уровне. Также при привлечении шлака ВОС за счет возможности полного замещения в аглошихте сырого известняка прогнозируется снижение расхода коксовой мелочи на уровне 10%.

Опытный железофлюс, поступивший в доменный цех, отличался от обычного равномерностью гранулометрического состава. В связи с незначительным количеством загруженного в доменные печи опытного железофлюса (1216 т) оценить изменение показателей работы доменного цеха не представилось возможным.

Работа по данному направлению будет закончена после проведения более продолжительного опытного спекания и доменной проплавки железофлюса со шлаком ВОС, при его максимальной дозировке в аглошихту.

Как отмечено выше, по второму направлению утилизации шлака ВОС (в качестве щебня, добавки для цементной промышленности или в качестве источника извести для сталеплавильного производства) необходимо предусматривать обязательную стабилизацию структуры шлака.

Таблица 3

	БАЗА без шлака ВОС	ОПЫТ с использованием шлака ВОС
Состав шихты, %:		
Шлак ВОС	0,0	3,3
Известняк	4,3	2,2
Отсев агломерата	3,5	2,8
Смесь отходов ЕВРАЗ НТМК	64,8	59,1
Шлам Лебяжинского аглоцеха ОАО «ВГОК»	11,2	12,7
Шлам конвертерного цеха ЕВРАЗ НТМК	9,5	15,0
Ванадийсодержащий конвертерный шлак	6,7	4,9
Показатели аглопроцесса		
Высота слоя шихты, мм	300	300
Удельная производительность а/м, т/м^{2}ч	1,112	1,160
Скорость а/лент, м/мин.	1,18	1,22
Нагрузка шихты (ср. на две а/м), т/ч	180	190
Прочность агломерата, %		
Содержание фракции –5 мм, %	6,9	6,9
Прочность, Б +5 мм; %	74,3	74,6
Истираемость, Б –0,5 мм; %	4,4	4,5
Химсостав агломерата, %		
Fe	51,6	53,0
S	0,06	0,03
FeO	13,3	14,0
CaO	13,4	12,7
SiO_2	5,9	5,7
Основность	2,27	2,21
MgO	3,33	3,28
TiO_2	1,70	1,77
Mn	0,39	0,32
V_2O_5	0,61	0,55
Al_2O_3	2,73	2,74
Zn	0,07	0,07

Существуют и применяются различные способы стабилизации самораспадающихся шлаков [1]:

1. Термическая стабилизация высокотемпературных модификаций двухкальциевого силиката (C_2S) путём их резкого охлаждения (закалка). За счёт закалки высокотемпературная модификация β-C_2S приобретает способность сохранять свои качества в диапазоне температур от 25 до 700 °С.
2. Стабилизация шлака введением в него боратов, основанная на частичном замещении в структуре C_2S ионов ионами бора, препятствующими трансформации β-C_2S в γ-C_2S при полиморфном превращении.
3. Не боратная стабилизация, основанная на изоморфном замещении ионов Ca^{2+} на Mg^{2+}, K^+, Ba^{2+}, Cr^{3+}, Mn^{2+} и ионов SiO_4^{4-} на SO_4^{2-} и PO_4^{3-}. Для стабилизации высокотемпературных модификаций α-C2S и α'-C_2S используются оксиды MgO, $A_{12}O_3$, Fe_2O_3, BaO, K_2O, P_2O_5 и Cr_2O_3, а для стабилизации β-C_2S — оксиды Na_2O, K_2O, BaO, MnO_2, Cr_2O_3 или их комбинации.

4. Химическая стабилизация, основанная на управлении фазовым составом шлака путем введения в него химических соединений, исключающих образование минерала C_2S.

В настоящее время рассматривается предложение по проведению химической стабилизации рафинировочных шлаков при введении алюминийсодержащих добавок в ковшевой шлак.

Список литературы

1. Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Некрасов И.В. и др. Вопросы утилизации рафинировочных шлаков сталеплавильного производства. Монография. — Нижний Тагил: УрФУ, 2017. С. 8–36.
2. Сорокин Ю.В., Демин Б.Л., Чижикова В.М. и др. Стабилизация самораспадающихся шлаков // Сталь. 2015. № 11. С. 52–56.
3. Темников В.В., Калимулина Е.Г., Тлеугабулов Б.С. Анализ образования и переработки металлургических отходов в АО «ЕВРАЗ НТМК» // Черные металлы. 2018. № 7. С. 32–37.

Д.Н. Волков, А.Л. Мамонов, А.А. Парфенов,
ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат»

ПРОИЗВОДСТВО АГЛОМЕРАТА С СОДЕРЖАНИЕМ ЖЕЛЕЗА 62%

Наиболее распространенным способом получения железа из руды является доменный процесс. Доменная печь, как достаточно экономичный агрегат высокой производительности, в настоящее время не имеет серьезных конкурентов и в обозримом будущем останется основным агрегатом для производства чугуна [2–4]. В то же время успешная работа доменной печи во многом определяется качеством используемого в шихте окускованного сырья.

Основными процессами окускования в черной металлургии являются производство агломерата и обожженных окатышей. Доля агломерата в современной доменной шихте в среднем по миру составляет около 70% [5].

В настоящее время агломерация переросла своё первоначальное назначение. И сейчас это сложный металлургический процесс получения материала с заданными физико-химическими свойствами.

Высокогорский горно-обогатительный комбинат создан в 1721 году. Это горнорудное предприятие по добыче железной руды, известняка, их переработке и производству товарной продукции для металлургической, строительной и цементной промышленности.

Сейчас ОАО «ВГОК» — крупное предприятие, имеющее в своем составе следующие структурные подразделения: шахты Магнетитовая, Естюнинская, «Южная» и ДОФ-4; Высокогорский обогатительный цех (ВОЦ); Лебяжинский аглоцех (ЛАЦ); предприятие железнодорожного транспорта (ПЖТ); автоцех; центральную лабораторию комбината (ЦЛК); управление комбината.

Основные виды продукции ОАО «Высокогорский ГОК» и их краткая характеристика представлены в таблице 1.

Таблица 1. Виды продукции ОАО «ВГОК»

Наименование	Краткая характеристика	Область применения
Агломерат железорудный доменный	Массовая доля железа 62,0%; основность до 0,5	Является сырьем для производства чугуна
Железофлюс	Массовая доля железа 50,0%; основность 2,3	Является сырьем для производства чугуна
Концентрат ММС	Массовая доля железа 65,0%	Является сырьем для производства окускованного ЖРС
Известняк флюсовый	Фракции: 0–6 мм 6–40 мм 40–80 мм	Используется в производстве агломерата, окатышей, чугуна, стали, ферросплавов.
Щебень	Отходы сухого магнитного обогащения, получаемые при производстве руд; Фракция 5–20 мм	Предназначен для строительных работ, строительства автодорог, благоустройства и планировочных работ. Применяется в качестве заполнителя бетона
Песчано-щебеночная смесь	ПЩС представляет собой отходы сухого магнитного обогащения (ПЩС фракции 0–10 мм) или отходы мокрого магнитного обогащения (ПЩС фракции 0–2,8 мм)	Применяется для устройства покрытий переходного типа и оснований автодорог, для производства бетона
Мраморная крошка	Получают путем дробления мрамора и мраморизованного известняка.Фракция 5–20 мм	Предназначена для наружной и внутренней декоративной отделки, а также для производства декоративных плит.

Основу товарной продукции ВГОК составляет агломерат и концентрат ММС.

В составе агломерационного цеха 4 агломашины МАК-75, одна из которых на данный момент законсервирована. Фактическая среднемесячная производительность аглоцеха по основным агломератам:

- 60 тыс. т./мес. — железо-ванадиевый флюс;
- до 75 тыс. т./мес. — железорудный агломерат.

За 2013–2018 г. железорудный доменный агломерат, производимый комбинатом, содержал 56,9% общего железа. Естественная основность (CaO/SiO_2) составляла 0,43 ед. Основа состава шихты — собственный концентрат ММС (68% от расхода агломерационной шихты с содержанием железа 63,0%) и руда железная сидеритовая производства ООО «Бакальское рудоуправление» с содержанием железа 28,4%. Агломерат обладал прочностью по ГОСТ 15137-77: по классу +5 мм — 67,2%, по классу –0,5 мм — 7,8%.

Можно сказать, что приведённые выше показатели не обеспечивают высокую металлургическую ценность агломерата. Продукт не является широко востребованным.

При этом требования, выдвигаемые доменным процессом к качеству агломерата, следующие: максимальное содержание основного компонента (железа), стабильность химического состава, минимальное содержание вредных примесей, минимальное содержание мелочи и крупных кусков, хорошая механическая прочность в холодном состоянии, высокая восстановимость, достаточная «горячая» прочность.

Одним из приоритетных направлений маркетинговой стратегии ОАО «ВГОК» на сегодняшний день является повышение качества выпускаемых видов продукции при снижении затрат на их производство.

Целевыми показателями по железорудному агломерату были обозначены:

1. содержание железа не менее 62,0% — уровень железорудных окатышей;
2. сохранение достигнутых прочностных показателей;
3. минимальное снижение производительности агломашин.

Определены направления для достижения данных показателей:

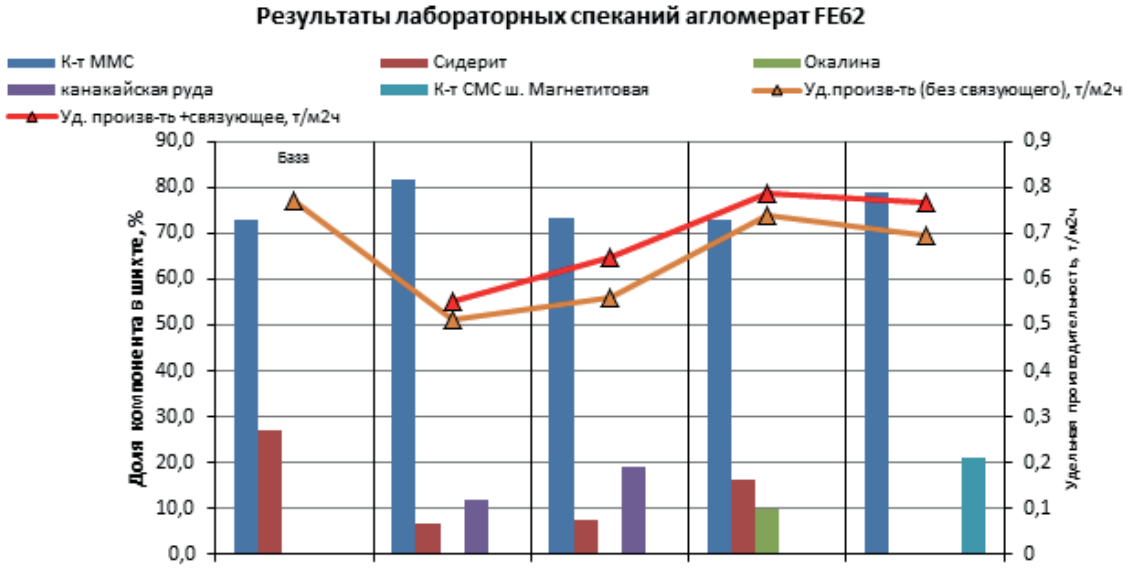
— привлечение богатых железом сторонних материалов с сохранением рядового содержания железа в концентрате ММС (63,0%);

— изменение схемы обогащения собственных руд с увеличением содержания железа в концентрате ММС собственного производства до 65,0%.

В лабораторных условиях были проработаны несколько вариантов получения железорудного агломерата заданного качества:

1. избыточное содержание концентрата ММС в аглошихте ($Fe_{к-т}$ = 63,0%);
2. привлечение в состав шихты богатой руды Канакайского месторождения с содержанием железа более 60,0%;
3. привлечение в состав шихты прокатной окалины;
4. полный вывод из состава шихты сидеритовой железной руды. С привлечением обогащённой по изменённой схеме собственной руды ш. Магнетитовая.

Результаты лабораторных спеканий (рисунок 1).



	База	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3	Вариант № 4
Сод. Fe к-т / Fe агл-т,%	63,0 / 57,0	63,0 / 62,0	65,0 / 62,0	65,0 / 62,0	65,0 / 62,0
Доступность шихтовых материалов	=	–	–	– –	+
Себестоимость шихты	=	+	++	++	=+
Прочность Б +5 мм,% / Б –0,5 мм,%	70,2 / 7,2	61,2 / 9,6	69,1 / 8,0	74,1 / 7,4	70,4 / 7,5

Рис. 1. Результаты лабораторных спеканий

Варианты с избыточным содержанием концентрата ММС (более 80% в составе шихты) не обеспечили необходимой прочности спёка и производительности. Привлечение окалины и руды Канакайского месторождения существенно увеличивают себестоимость шихты и не являются общедоступными компонентами. К реализации принят вариант с привлечением обогащённой руды шахты «Магнетитовая», требующий изменения схемы обогащения (Рисунок 2). Руда шахты «Магнетитовая» горизонта –530 м.

проходит сухую магнитную сепарацию и обогащается до промежуточного продукта с содержанием железа 50,0%, который является выгодной альтернативой привозным рудам в составе агломерационной шихты. При этом её использование для обогащения на мокрой магнитной сепарации минимизировано из-за того, что её обогащение методом мокрой магнитной сепарации позволяет получить концентрат с массовой долей железа не более 62%, что обусловлено плохой степенью раскрытия магнетита в классе крупности более 0,071 мм. Качество концентрата резко падает при вовлечении в него сростков с объемным содержанием магнетита в них от 5% до 30% (бедные сростки).

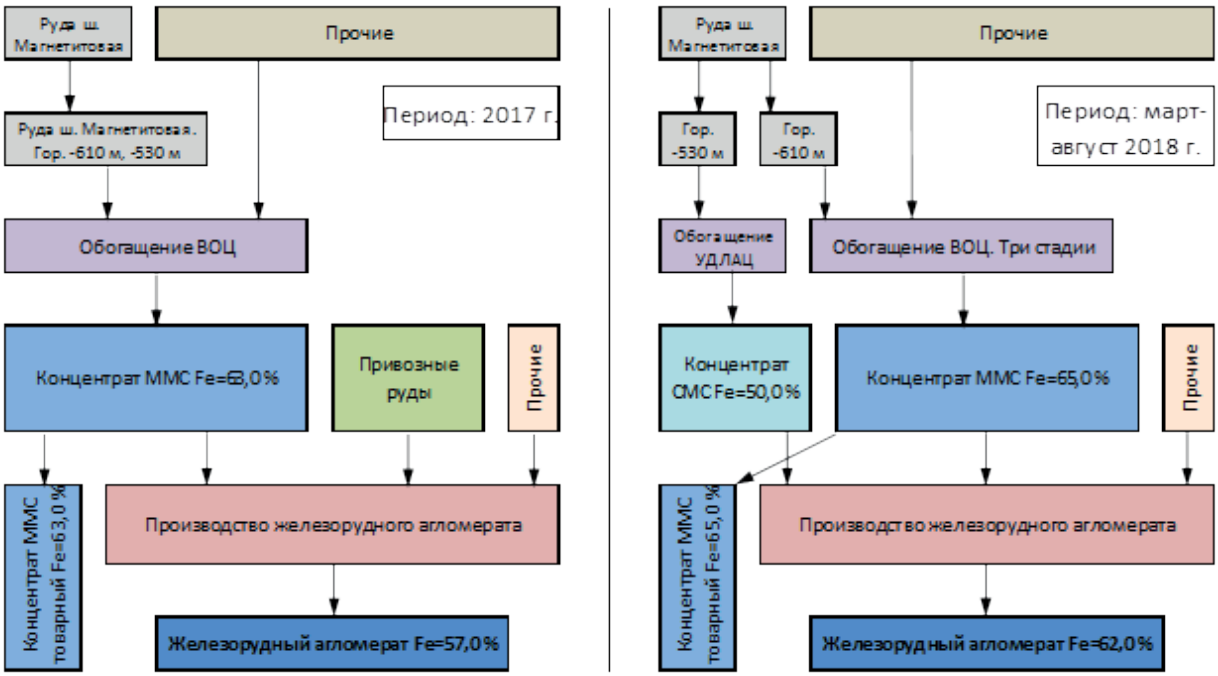


Рис. 2

Проекты обогащения сырья в три стадии и раздельная переработка руды шахты «Магнетитовая» по горизонтам реализованы в начале 2018 года. Данные мероприятия позволили повысить содержание общего железа в концентрате ММС с 63,0% до 65,0%.

Реализации варианта № 4 позволило оптимизировать сырьевые потоки ОАО «ВГОК» при одновременном снижении себестоимости получаемой готовой продукции за счёт исключения из состава сырья привозных руд.

Но при этом мы столкнулись с ещё одной достаточно серьёзной проблемой — повышенные доли концентрата ММС (до 80%) в опытных шихтах, что, несомненно, при использовании в составе агломерационной шихты большой доли мелкодисперсного сырья вызывает ухудшение ее газопроницаемости и приводит к снижению:

- скорости фильтрации газа;
- интенсивности теплообмена и процессов спекания;
- удельной производительности агломашин;
- качества агломерата,

а также увеличению выбросов экологически вредной пыли с аглогазами.

Хорошая газопроницаемость аглошихты нужна для того, чтобы при относительно небольших перепадах давления над и под слоем объем газов, образующихся при горении топлива, успевал проходить через межчастичные каналы слоя [6]. Таким образом, особое значение в технологии агломерации приобретает предварительное окомкование шихты, которое заключается в формировании гранул размером от 2 до 8 мм и направлено на повышение газопроницаемости слоя. Окомкование оказывает

влияние не только на величину $d_{экв}$ гранул, но и на способность сохранять полученный в результате окомкования гранулометрический состав [7].

Залогом достижения высоких технико-экономических показателей агломерационной технологии является организация эффективного процесса окомкования, что обеспечивает интенсивное поступление кислорода воздуха в спекаемый слой, необходимое для горения частичек твердого топлива, требуемую сегрегацию частиц по высоте слоя и высокую прочность гранул при переносе тепловой энергии в слое шихты.

Учитывая необходимость (заявка потребителя) производства агломерата с естественной основностью («кислого») и в результате невозможность использования в качестве связующего и интенсификатора агломерационного процесса обожжённую известь, была разработана и внедрена технология окомкования аглошихты на основе инновационных связующих добавок. Данный способ позволяет управлять процессом окомкования с минимальными энергозатратами, исключает изменение конструктивных элементов окомкователей и усложнение существующей на предприятии технологии в целом.

Опытно-промышленные испытания в ОАО «ВГОК» при производстве агломерата с привлечением связующего успешно были проведены в феврале 2018 года. Оптимум его расхода определён ранее лабораторными и опытно-промышленными испытаниями в 2017 году. Участок подачи и дозировки связующего организован в отделении шихтоподготовки участка агломерации ЛАЦ ОАО «ВГОК». Смонтирован приемный бункер и два безосевых шнековых транспортера D-90 с частотной регулировкой скорости вращения. Схема участка дозировки связующего приведена на рисунке 3.

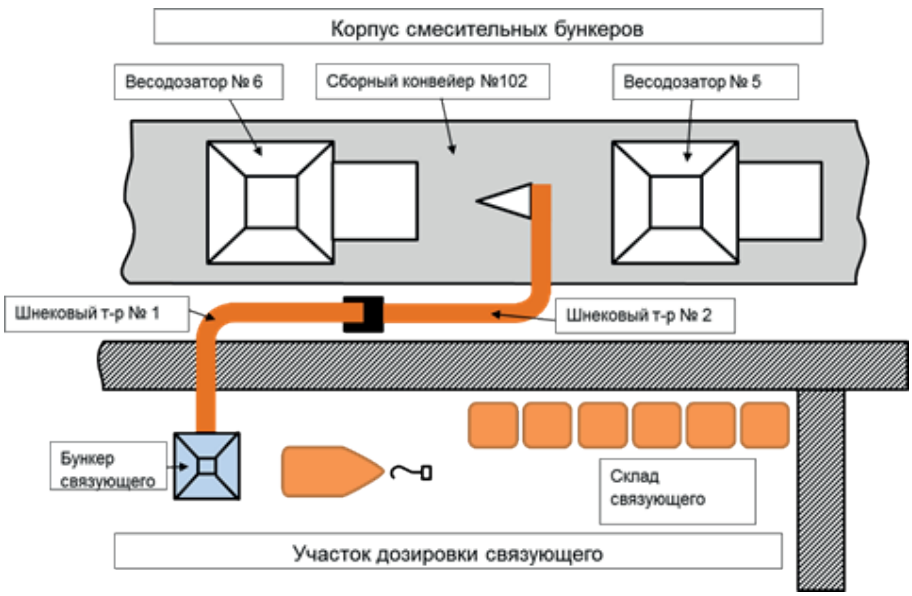


Рис. 3. Схема участка дозировки связующего

Отмечено, что общеизвестная обратная зависимость удельной производительности агломашин от содержания концентрата ММС в шихте изменяется в более благоприятную сторону при использовании связующего 030СВ производства ООО «Полипласт УралСиб». При увеличении доли концентрата ММС сверх оптимального значения (до ≤76–77%) в технологических условиях ЛАЦ ОАО «ВГОК» величина удельной производительности агломашин остается относительно стабильной. Неизбежное её снижение фиксируется только при содержании концентрата более 80,0%. Другими словами, привлечение связующего Термопласт 5СВ позволило повысить пороговое содержание концентрата ММС в шихте и, в итоге, при производстве агломерата с содержанием железа 62% позволило сохранить и увеличить удельную производительность агломашин на 17,4%, снизить удельный расход кокса на 9,0%, а также удельные расходы газа, воздуха и электроэнергии снизить на 10,3%, 10,4% и 12,0% соответственно.

Начиная с марта 2018 г., ОАО «ВГОК» производит в адрес ПАО «ЧМК» железорудный неофлюсованный агломерат с содержанием железа 62,0%. Основа состава шихты — концентрат ММС ОАО «ВГОК»

с содержанием железа 65,0% и обогащённая руда шахты «Магнетитовая» с содержанием железа 50,0%. В таблицах 2, 3 приведены фактические показатели качества агломерата и производительности агломашин в сравнении с предыдущим периодом производства железорудного агломерата с содержанием железа 57%.

Таблица 2

Период, Вид агломерата	Химический состав,%											
	Fe	FeO	S	Осн-ть CaO/SiO_2	CaO	SiO_2	MgO	TiO_2	Al_2O_3	V_2O_5	Mn	Zn
2017 г., Ж/р Fe57	56,82	15,8	0,02	0,43	3,67	8,49	3,25	0,52	3,55	0,18	1,21	0,04
03-07.2018 г , Ж/р Fe62	61,95	21,3	0,02	0,48	2,73	5,64	2,00	0,51	2,51	0,16	1,15	0,07

Таблица 3

Период, Вид агломерата	Показатели прочности,%			Индекс LTD (Низкотемпературного разрушения), ISO 13930			Удельная производительность агломашин, т/м²ч	
	Б +5 мм	Б –0,5 мм	Сод. фр. –5 мм	+6,3 мм	+3,15 мм	–0,5 мм	без привлечения связующего	с привлечением связующего — 4,5 кг/т агл.
2017 г. Ж/р Fe57	67,4	7,8	10,3	31,2	44,2	15,0	0,74	0,85
03-07.2018 г. Ж/р Fe62	67,3	7,6	9,0	50,4	29,6	13,9	0,69	0,77

Реализация стратегического направления по улучшению металлургических свойств готовой продукции производства ОАО «ВГОК» при одновременном снижении затрат на её производство позволила повысить конкурентоспособность продукции ОАО «ВГОК» в условиях нестабильных цен на железорудное сырьё.

На сегодняшний день нами сделан следующий шаг — реализация схемы по охлаждению и стабилизации железорудного агломерата.

Список литературы

1. Вышегородский, Д. Перспективы развития черной металлургии России. [Текст] / Д. Вышегородский // Уральский рынок металлов. — 2004. — № 10. — С. 18–21.
2. Юсфин, Ю.С. Основные направления доменного производства в России. [Текст] / Ю.С. Юсфин, В.А. Шатлов, В.М. Федченко // Черная металлургия России и стран СНГ в 21 веке : международная конференция, Москва, июнь 6–10, 1994. — М.: Металлургия, 1994. — Т. 1, с. 78–81.
3. Ван Стейн Калленфелдс, Дж. Е. Совершенствование технологии производства чугуна на заводе Hoogovens (Голландия). [Текст] / Дж. Е. ван Стейн Калленфелдс, Дж. ван Лаар, Г.Дж. Тиджуйс // Черная металлургия России и стран СНГ в 21 веке: международная конференция, Москва, июнь 6–10, 1994. — М.: Металлургия, 1994. — Т. 1, с. 87–88.
4. Шпарбер, Л.Я. Металлургия железа и чугуна. Справ. изд. В 2-х книгах. Книга 2-я. Состояние. Перспективы. [Текст] / Л.Я. Шпарбер. — Тула: АССОД, 1996. — 368 с.
5. Александров, Л. И. Современное состояние агломерационного производства [Текст] / Л.И. Александров // Приложение № 3 к журналу «Новости черной металлургии за рубежом». — 2001.
6. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз. Екатеринбург, 2001.
7. Жилкин В.П., Доронин Д.Н. Производство агломерата. Технология, оборудование, автоматизация. Уральский центр ПР и рекламы — «Марат», Екатеринбург, 2004.

В.Г. Дружков, ТМиЛП ФГБОУ ВО «МГТУ»
И.В. Макарова, И.Е. Прохоров, ПАО «ММК»

РАЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЦЕПИ АППАРАТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ПО КРУПНОСТИ АГЛОМЕРАТА

В стабилизации химического состава достигнуты существенные результаты. Современные усреднительные комплексы железорудного сырья гарантируют отклонения от среднего содержания железа в исходящем продукте не более +/–0,2% (Япония).

Стабилизация агломерата по крупности — относительно новое направление повышения его качества. Внедрение такой технологии возможно при спекании агломерата с высотой слоя агломерационной шихты не менее 450–500 мм. Сущность технологии получения стабилизированного по крупности агломерата заключается в сознательном приложении к агломерату работы разрушения. В результате доля мелочи асимптотически приближается к пределу, при достижении которого разрушение прекращается. После разрушения агломерата мелочь отсеивается. Агломерат можно считать стабилизированным по крупности, если содержание фракции –5 мм в скиповом агломерата не превышает 2%, а вынос пыли из доменной печи при проплавке данного агломерата не более 4–7 кг/т чугуна. Это очень высокие требования, поэтому мало агломерационных фабрик в мире производят стабилизированный по крупности агломерат. Аглофабрики, которые освоили эту технологию, имеют довольно сложную схему цепи аппаратов: она включает три-четыре стадии дробления и грохочения агломерата.

Анализ показал, что схему цепи аппаратов для производства стабилизированного по крупности агломерата можно упростить, если использовать в ней роторную дробилку для разрушения спека и барабанный грохот для отсева мелочи.

Использование роторной дробилки [1] гарантирует получение кусков агломерата менее 80 мм. Гарантированная предельная крупность ку-

сков в пределах 40–80 мм достигается числом оборотов ротора дробилки и конструкцией отражательного экрана.

Барабанный грохот был испытан для грохочения агломерата в агломерационном цехе Магнитогорского металлургического комбината [2] и на Высокогорской агломерационной фабрике [3]. Он органически вписывается в состав стабилизирующего комплекса. При движении в нем агломерата в режиме переката непрочные куски разрушаются, острые углы обламываются. Эффективность грохочения была настолько высокой, что при высоте слоя спекаемой шихты 240 мм и менее выход годного резко снизился. Барабанные грохоты были демонтированы и заменены на стационарные. При внедрении технологии спекания агломерата с высотой слоя шихты 500 мм и более использование в стабилизирующем комплексе тандема из инерционной дробилки и барабанного грохота позволит получить стабилизированный по крупности агломерат при одной стадии дробления и максимум двух стадиях грохочения. Схема цепи аппаратов для получения охлажденного и стабилизированного по крупности агломерата предельно упрощается и стоимость оборудования существенно снижается.

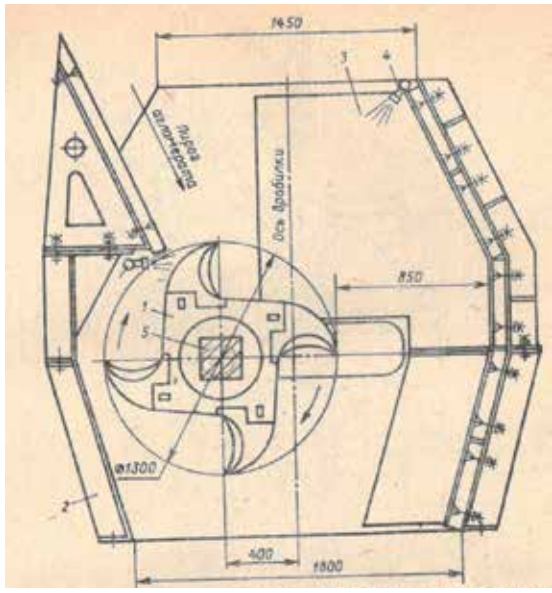


Рис. 1. Роторная дробилка

Рис. 2. Барабанный грохот

Рис. 3. Внутренняя часть барабанного грохота

Список литературы

1. Борискин И.К., Быков М.С., Губанов Б.И. и др. Механическая обработка агломерата с помощью дробилки инертно-ударного действия. Известия Вузов. Черная металлургия [News Universities. Ferrous metallurgy]. 1982, № 4, с. 20–24.
2. Зудин В.М., Сагайдак И.И., Якобсон А.П., Бабарыкин Н.Н. Получение грохоченного агломерата и использование его в доменной плавке. Сталь [Steel]. 1962, № 8, с. 675–679.
3. Симаков Ю.В., Базилевич С.В., Худорожков И.П. Грохочение агломерата в барабанных грохотах на Высокогорской фабрике. Сталь [Steel]. 1968, № 9, с. 768–772.

В.В. Матлашевский, А.В. Калашников,
ООО «Металлургпромснаб»,
В.А. Кобелев, ОАО «Уральский институт металлов»
Г.А. Нечкин, ОАО «Уральский институт металлов»,
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет»

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНВЕРТОРНОГО НИКЕЛЕВОГО ШЛАКА НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ

АННОТАЦИЯ

В результате лабораторных исследований оценено влияние конверторного никелевого шлака на металлургические свойства агломерата и фильтруемость продуктов плавки через коксовую насадку, позволяющее повысить эффективность аглодоменного передела.

Ключевые слова: руда, конверторный никелевый шлак, фаялит, шихта, агломерат, доменная плавка, прочность, интервал вязко-пластичного состояния, восстановимость, фильтруемость продуктов плавки, коксовая насадка, производительность.

Наряду с повышением технико-экономических показателей аглодоменного передела, актуальным остается вопрос ресурсосбережения при производстве чугуна, в том числе утилизация железосодержащих отходов [1]. Промышленное применение таких материалов ограничивается, в том числе, отсутствием комплексной оценки влияния на технологические показатели аглодоменного передела. Данная работа выполнена в рамках комплексного аглодоменного исследования металлургических свойств конверторного никелевого шлака. Конверторный

никелевый шлак, несмотря на относительную новизну, уже успел себя положительно зарекомендовать в ДЦ ПАО «ЧМК» и АО «АрселорМиттал Темиртау» (АО «АМТ») [2].

1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНВЕРТОРНОГО НИКЕЛЕВОГО ШЛАКА В АГЛОМЕРАЦИИ

На основе базовой шихты АО «АрселорМиттал Темиртау» были проведены спекания с использованием в составе шихты никелевого шлака в количестве 25, 50 и 100 кг/т агломерата с эквивалентной заменой части аглоруд, корректировкой расхода известняка и топлива [3].

Гранулометрический состав окомкованной шихты с вводом никелевого шлака изменяется несущественно, но вертикальная скорость спекания по сравнению с базовым вариантом растет. С учетом выхода годного удельная производительность по сравнению с базовым вариантом увеличивается на 17,5–23,4 отн. % (рис. 1).

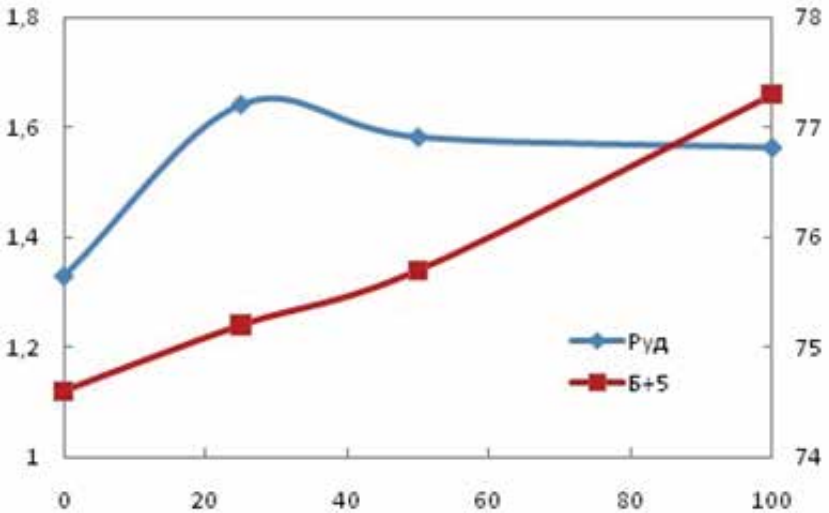


Рис. 1. Влияние содержания никелевого шлака в базовой шихте на удельную производительность и прочность агломерата
Удельная производительность, т/м²·ч; содержание никелевого шлака в шихте, кг/т; прочность, Б+5 мм, %

Замена части аглоруд АО «АМТ» никелевым шлаком способствует также увеличению прочности агломерата. Наибольшая прочность достигнута при вводе в шихту 100 кг/т никелевого шлака, что связано с высоким содержанием FeO.

В настоящее время подобные исследования проводятся применительно к шихтовым условиям АГП ПАО «НЛМК», предварительные результаты спекания шихт при расходе никелевого шлака в 50 кг/т свидетельствуют об увеличение прочности агломерата (Б+5 мм ГОСТ 15137-87) на 7,8 отн. % при сохранении удельной производительности.

Положительное влияние на процесс спекания шихты и прочность агломерата объясняется преобладанием в никелевом шлаке легкоплавкой фаялитовой фазы ($2FeO{\cdot}SiO_2$). Образование низкотемпературного расплава способствует более полной ассимиляции кремнезема железорудных материалов, а также оксидов кальция и магния флюсовой части шихты [4]. Результаты микрорентгеноструктурного анализа показали, что быстрое и более полное растворение пустой породы и флюсов позволяет раскристаллизовать силикатную связку и тем самым повысить прочность агломерата.

Повышение вертикальной скорости спекания можно объяснить также изменением процессов плавления и кристаллизации расплава, формирующих газопроницаемую структуру шихты в зоне плавления.

Негативным фактором при вводе никелевого шлака является снижение содержания железа в агломерате с одновременным увеличением концентрации кремнезема, что требует повышения расхода известняка и, соответственно, твердого топлива при больших расходах никелевого шлака в шихте.

2. ВЛИЯНИЕ КОНВЕРТОРНОГО НИКЕЛЕВОГО ШЛАКА НА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВОЙСТВА АГЛОМЕРАТА И ПРОЦЕСС ФИЛЬТРАЦИИ ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ ЧЕРЕЗ КОКСОВУЮ НАСАДКУ

Высокотемпературные свойства железорудных материалов характеризуют их поведение в доменной печи при нагреве в восстановительной среде: восстановимость, разрушаемость при восстановлении, температурный интервал размягчения-плавления и фильтруемость продуктов плавки через коксовую насадку. Эти свойства железорудных материалов оказывают существенное влияние на газопроницаемость столба шихты в доменной печи и в значительной степени определяют производительность [5,6].

Введение никелевого шлака в базовую агломерационную шихту АО «АМТ» увеличило восстановимость (долю отнятого кислорода) агломерата на 10,4 отн.% и позволило уменьшить разрушаемость при восстановлении.

Определение параметров вязко-пластичного состояния железорудных материалов произведено по ГОСТ 26517–85 «Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения температуры начала размягчения и температурного интервала размягчения». Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры пластично-вязкого состояния железорудных материалов

Железорудный материал	$T_р$, °C	$T_{пл}$,°C	$T_{пл}$–$T_р$, °C
Базовый агломерат	1101	1452	351
Агломерат с Ni-шлаком (100 кг/т)	1160	1438	278
Руда Атасу	995	1263	268
Окатыши ССГПО	861	1157	296
Никелевый шлак	1051	1120	69

Агломерат с Ni-шлаком отличается от базового более высокой температурой начала размягчения и более узким интервалом вязко-пластичного состояния. Его применение в базовом варианте должно способствовать снижению газодинамического напряжения в печи.

Использование никелевого шлака в доменной шихте совместно с окатышами ССГПО или рудой Атасу не приводит к повышению газодинамического напряжения в печи, поскольку зона пластично-вязкого состояния окатышей и руды значительно шире, чем у никелевого шлака.

Зона фильтрации продуктов плавки через коксовую насадку является продолжением зоны когезии и характер взаимодействия коксовой насадки с расплавами и газами определяет нормальную работу горна и различные расстройства, связанные с загромождением коксовой насадки неплавкими массами [7–8].

Влияние никелевого шлака на фильтруемость продуктов плавки [9] исследовалось на базовой доменной шихте АО «АМТ»[10]. Из результатов исследования (табл. 2) видно, что фильтруемость шлака в доменной шихте с содержанием никелевого шлака 10% на 31,4 абс. % превосходит фильтруемость базовой шихты. С вводом никелевого шлака на 38% снижается время фильтрации.

Содержащийся в никелевом шлаке фаялит на верхних горизонтах доменной печи эффективно ассимилирует коксовый мусор и спель, тем самым предотвращая загромождение горна и улучшая фильтруемость продуктов плавки.

Визуальный анализ коксовой насадки после плавки (рис. 2) также подтверждает значительное снижение зашлакованности коксовой насадки при вводе в доменную шихту конверторного никелевого шлака.

Таблица 2. Показатели фильтруемости продуктов плавки железорудных материалов АО «АМТ» через коксовую насадку

Компоненты доменной шихты и составы доменных шихт	Фильтруемость продуктов плавки всего, %	Фильтруемость шлака, %	Время фильтрации, мин
Базовый агломерат	93,5	80,5	58
Агломерат с Ni-шлаком (100 кг/т)	94,5	83,7	46
Окатыши ССГПО	92,1	63,8	45
Базовая шихта (Агломерат 75%, Аглоруда Атасу 5%, Окатыши ССГПО 20%)	84,9	60,4	39
Базовая шихта с Ni-шлаком 5% (Агломерат 75%, Окатыши ССГПО 20%, Ni-шлак 5%)	93,9	80,9	31
Базовая шихта с Ni-шлаком 7,5% (Агломерат 75%, Окатыши ССГПО 17,5%, Ni-шлак 7,5%)	96,4	89,1	35
Базовая шихта с Ni-шлаком 10% (Агломерат 75%, Окатыши ССГПО 15%, Ni-шлак 10%)	97,1	91,4	24

Рис. 2. Коксы после фильтрации.
1) доменная шихта с Ni-шлаком 7,5%; 2) базовая доменная шихта

ВЫВОДЫ

Установлена благоприятная роль конверторного никелевого шлака в агломерационном и доменном переделах АО «АрселорМиттал Темиртау».

Введение конверторного никелевого шлака в агломерационную шихту способствует повышению удельной производительности аглопроцесса и прочности агломерата. Использование конверторного никелевого шлака в агломерационной и/или в доменной шихте позволяет улучшить высокотемпературные свойства железорудного сырья и повысить фильтруемость шлаков через коксовую насадку, что благоприятно отражается на производительности доменного процесса.

Список литературы

1. Долинский В.А., Никитин Л.Д., Одинцов А.А., Домнин К.И. Рецикл техногенных отходов при производстве агломерата и чугуна. Известия вузов. Черная металлургия. 2010. № 8. С. 41–44.
2. Еремеев Н.А., Лысюк А.Ж. Опыт промышленного использования конверторного шлака Южно-Уральского никелевого комбината в качестве раскислителя в ДЦ ПАО «ЧМК». Сталь №3, 2018, с. 7.
3. Дьяков А.В., Одинцов А.А., Кобелев В.А., Нечкин Г.А. Сообщение 1. Оптимизация агломерационных шихт на основе определения технологических показателей и комплекса металлургических свойств. Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». — 2018. — № 10.
4. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Введение в технологии металлургического структурообразования. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 501 с.
5. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Функциональные свойства железорудных материалов. Екатеринбург: 2015. 617 с.
6. Пузанов В.П., Нечкин Г.А., Кобелев В.А., Чернавин А.Ю. Об интенсивности орошения коксовой насадки и фильтруемости продуктов плавки доменной печи. Бюллетень научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. 2011. Вып. 8. С. 45–54.
7. Пузанов В.П., Нечкин Г.А., Онорин О.П., Кобелев В.А., Чернавин А.Ю. О плотности орошения продуктами плавки коксовой насадки доменной печи, Сталь, 2012, № 4. С. 7–15.
8. Пузанов В.П., Нечкин Г.А., Птичников Г.А., Кобелев В.А., Чернавин А.Ю. Основы работы противоточной коксовой насадки доменной печи (сообщение 2), Сталь, 2012, № 8.
9. Чернавин А.Ю., Нечкин Г.А., Чернавин Д.А., Кобелев В.А., Филатов С.В. Моделирование поведения шихтовых материалов в нижней части доменной печи, Сталь, 2010, № 5. С. 20–23.
10. Дьяков А.В., Витущенко М.Ф., Одинцов А.А., Кобелев В.А., Чернавин А.Ю., Нечкин Г.А. Оптимизация аглодоменных шихт по комплексу металлургических свойств. Сообщение 2. Оптимизация компонентов доменных шихт по комплексу их высокотемпературных свойств // Бюллетень Черная Металлургия №11, 2018, с. 29–38.

Раздел VII
ПРОЦЕССЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ДЛЯ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

П.В. Чемякин, ЗАО НПП Машпром
Ю.С. Коробов, УрФУ
ОБСЛЕДОВАНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВОК СУХОГО ТУШЕНИЯ КОКСА 316

Ю.С. Коробов, УрФУ
М.С. Девятьяров, Уральский институт сварки-Металлургия
В.С. Козин, НПП «Машпром»
ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ 320

С.Н. Клюкин, ПАО «НЛМК»
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОКСА ОТ ЕГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА 330

П.В. Чемякин, ЗАО НПП Машпром
Ю.С. Коробов, Уральский федеральный университет

ОБСЛЕДОВАНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВОК СУХОГО ТУШЕНИЯ КОКСА

Точкой отсчета развития технологии установок сухого тушения кокса (УСТК) в Японии считается 1970 год. В этом году была запущена установка производительностью 56 т/ч на заводе Yawata Works построенная по лицензии ГИПРОКОКС. Предпосылки к внедрению и развитию УСТК в Японии стали: нефтяной кризис 1973 г., рецессия, высокая стоимость электроэнергии. Развитие технологии происходило по пути увеличения единичной производительности одной камеры. За первые 15 лет производительность единичной камеры выросла втрое, и в 2009 г. была построена самая большая УСТК производительностью 280 т/ч.

На коксохимических производствах России применяются УСТК конструкции ГИПРОКОКС конца 1960-х г.г. На 2018 год в эксплуатации находится 60 УСТК. В Японии эксплуатируется 24 УСТК. Основное отличие в подходах состоит в том, что в Японии используются однокамерные УСТК и мокрое тушение кокса на период ремонтов, а в России — многокамерные УСТК.

В сравнении с японскими установками у отечественных УСТК ниже производительность и срок службы оборудования.

На основании сопоставления конструктивных особенностей оборудования и технологии тушения кокса разработаны различные варианты модернизации отечественных УСТК с применением японских технологий и оборудования. Нами разработана методика модернизации существующих УСТК на основе конструктивных и технологических решений.

Для определения возможности модернизации УСТК необходимо проводить обследование в следующем объеме:

- детальный анализ технологических параметров эксплуатации каждой УСТК;

- обследование технического состояния оборудования;
- изучение конструктива оборудования;
- детальный анализ технологических параметров эксплуатации каждой УСТК;
- изучение технологических параметров работы УСТК, таких как:
  — фракционный состав и температура исходного кокса;
  — температура, давление, скорость и состав циркуляционного газа в разных точках системы камера-котел;
  — давление и температура в разных точках в котле;
  — температура потушенного кокса.

Количество параметров зависит от степени автоматизации УСТК. В случае отсутствия необходимых контрольно-измерительных приборов возможно использование переносных приборов. Исходя из полученных данных, проводится расчет режимов работы УСТК по японским математическим моделям.

1. ОБСЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Проводится с целью определения ключевых мест, подходящих для модернизации в данный конкретный момент. Больше всего подходят для модернизации УСТК, для которых планируется проведение капитального ремонта.

В общем случае для модернизации подходят следующие узлы:

- Загрузочный узел. Возможна установка конуса для равномерного распределения кокса по камере тушения. Это позволит более равномерно распределять фракционный состав кокса по сечению камеры.
- Футеровка камеры тушения. Возможна как замена огнеупорных материалов, так и структуры футеровки с целью повышения срока службы футеровки.
- Дутьевое устройство. Возможна замена дутьевого устройства для улучшения распределения скорости оседания кокса. Модернизация дутьевого устройства одновременно с установкой загрузочного конуса позволит повысить эффективность охлаждения за счет того, что распределение скорости осаждения кокса будет равномерным, так как распределение скорости осаждения кокса влияет на время нахождения кокса в камере.
- Субэкономайзер. Возможна установка субэкономайзера для снижения температуры циркуляционного газа на входе в камеру. Это позволит либо увеличить производительность камеры по потушенному коксу, либо снизить расход циркуляционного газа, а, следовательно, и потребляемую мощность электродвигателя. Возможность установки субэкономайзера, в первую очередь, зависит от наличия свободной площадки между вентиляторами и камерой тушения.
- Разгрузочное устройство. Возможна установка роторного разгрузочного устройства. Это позволит обеспечить непрерывную выдачу кокса.
- Вентилятор циркуляционного газа. Установка частотных преобразователей для двигателя вентилятора. Вместе с субэкономайзером позволит снизить потребляемую мощность электродвигателя.
- Нанесение газотермических покрытий на элементы УСТК.

В частности, практический опыт применения данной методики показал следующее:

1. Установка субэкономайзера перед камерой тушения (рисунок 1) обеспечивает снижение температуры циркуляционного газа до 130 °С. Это приводит к тому, что одинаковое количество кокса может быть потушено меньшим расходом циркуляционного газа. Соответственно, потребуется менее производительный вентилятор.
2. Модернизация дутьевого устройства и распределительного конуса.

Существующая конструкция дутьевого устройства (рисунок 2а) неизменна с самого начала разработки технологии. Ее отличает неравномерное распределение потока охлаждающего газа по сечению камеры и кокса по сечению камеры. Были проведены исследования по определению оптимального конструктива дутьевого устройства с целью равномерного опускания кокса по камере тушения и равномерного потока охлаждающего газа по сечению камеры.

Для равномерного распределения горячего кокса по сечению камеры установлен распределительный конус (рисунок 2).

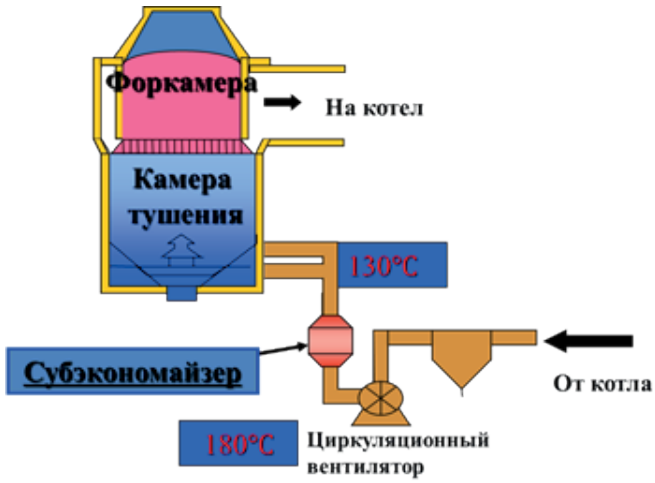
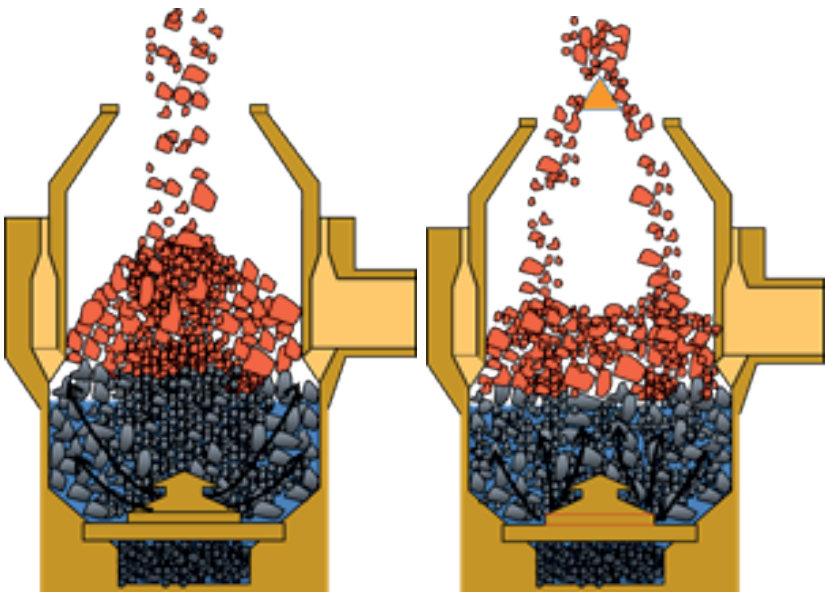


Рис. 1. Схема установки субэкономайзера



а) *б)*

Рис. 2. Конструкция дутьевого устройства. а — существующая, б — разработанная, оптимизированная по дутью, с распределительным конусом

3. Нанесение газотермических покрытий на элементы УСТК.

3.1. Разработана и опробована для аналогичных изделий технология нанесения износостойкого покрытия на лопатки колеса дутьевого вентилятора циркуляционного газа.

3.2. Разработана и опробована для аналогичных изделий технология нанесения износостойкого покрытия на трубы бойлера для установки сухого тушения кокса.

Применение указанных мероприятий обеспечивает следующие результаты:

— Установка субэкономайзера перед камерой тушения в сочетании с модернизацией дутьевого устройства и распределительного конуса обеспечивают снижение удельного расхода газа на 450 нм^3/т кокса за счет уменьшения температуры выдаваемого кокса (рисунок 3).

— Газотермическое покрытие на лопатках дутьевого вентилятора обеспечивают повышение ресурса в 3–6 раз в зависимости от базового материала лопаток (хромистые, нержавеющие, жаропрочные стали).
— Газотермическое покрытие на трубы бойлера обеспечивает повышение ресурса в 2–3 раза в зависимости от базового материала труб.

Рис. 3. Результаты установки субэкономайзера перед камерой тушения в сочетании с модернизацией дутьевого устройства и распределительного конуса

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксплуатация установок сухого тушения кокса в нашей стране сопровождается одинаковыми проблемами на всех коксовых батареях. Это пониженная производительность в сравнении с проектными показателями, высокие расходы на обслуживание и проведение ремонтов. Разработана методология и мероприятия определения и устранения узких мест на установках сухого тушения кокса. Данные разработки позволяют повысить технико-экономические показатели работы УСТК на отечественных предприятиях.

Ю.С. Коробов, Уральский Федеральный университет
М.С. Девятьяров, Уральский институт сварки-Металлургия
В.С. Козин, НПП «Машпром»

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Большая группа деталей металлургического оборудования подвержена воздействию высоких температур, контактных и ударно-абразивных нагрузок. Поэтому их восстановление актуально. Мировой опыт показывает высокую эффективность применения покрытий, полученных газотермическим напылением (ГТН), для восстановления и повышения ресурса значительной доли деталей [1, 2]. Проведён анализ целесообразности выбора различных методов ГТН для получения покрытий на деталях машиностроительного профиля. В качестве распыляемых материалов выбрали карбиды, металлы, образующие термобарьерные, износо- и коррозионностойкие покрытия, которые во многих практически важных случаях успешно противостоят разным видам износа, воздействию химически активных сред и тепловых нагрузок. Из рассмотрения исключены оксиды (алюминия, хрома, циркония и др.), которые успешно распыляются плазмой и служат для специальных применений. В качестве критериев выбора были приняты производительность, относительные затраты и качество получаемых покрытий.

Для металлургии характерны большеразмерные конструкции, подверженные износу по всей поверхности. Для них эффективно применение цельных листов, к которым предъявляется требование сочетания износостойкости и технологичности при их соединении сваркой.

По производительности предпочтительны методы ДМ и СГВ. По относительной стоимости ДМ-покрытия в 3…10 раз дешевле получаемых другими способами ГТН (рисунок 1, 2). Это обусловлено его высокой тепловой эффективностью, производительностью, низкой стоимостью напыляемых материалов и простотой обслуживания.

По критериям производительности и стоимости для дальнейшего рассмотрения оставили ДМ, ГПС, СГВ. Исключённые из рассмотрения

методы, обеспечивают высокое качество, однако для многих практически важных случаев ограничение по производительности критично и не позволяет их применять в качестве производственной технологии.

ДМ первым из ГТН был применён в широких промышленных масштабах ещё в начале XX века. Способ отличается простотой реализации, высокой производительностью и низкими удельными затратами.

Доля применения дуговой металлизации в общем объёме ГТН составляет 20…25%. Это защита от атмосферной и высокотемпературной коррозии (металлоконструкции, элементы тепловых станций), от различных видов износа деталей машин, а также получение биметаллических изделий.

Анализ показал, что технологически доля дуговой металлизации может быть увеличена в 1,5…2 раза. Однако качество (пористость, степень окисления и коэффициент использования материала (КИМ) покрытий, полученных типовой ДМ), недостаточны, чтобы обеспечить стабильную работоспособность деталей. Это препятствует расширению использования этого простого и дешёвого метода нанесения покрытий.

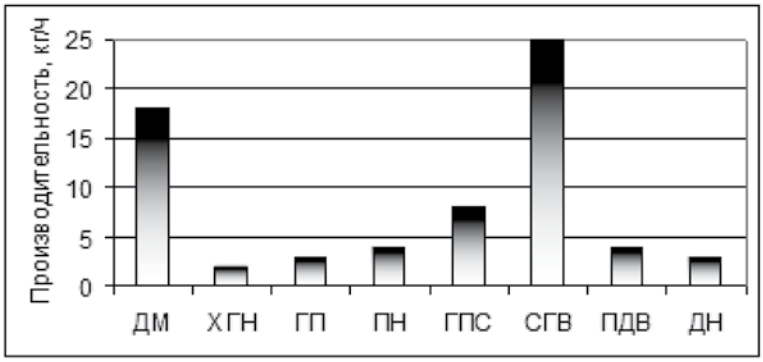


Рис. 1. Производительность различных методов ГТН. Распыление металлов [3–6]
Виды напыления: ДМ — дуговое; ХГН — холодное газодинамическое; ГП — газопламенное; ПН, ПДВ — плазменные способы (типовое, в динамическом вакууме); ГПС — газопламенное сверхзвуковое; СГВ — сверхзвуковое газовоздушное; ДН — детонационное

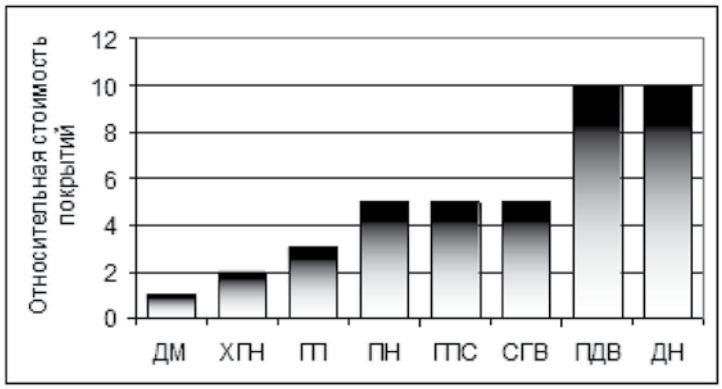


Рис. 2. Относительная стоимость покрытий для способов ГТН [3–6]

На основе моделирования процесса ДМ разработаны и внедрены в производство оборудование и технологии активированной дуговой металлизации (АДМ) [7]. К отличительным особенностям АДМ относится совместное использование продуктов сгорания восстановительных смесей в качестве транспортирующего газа, целенаправленного воздействия на зону горения дуги (рисунок 3).

У АДМ-аппаратов угол распыла уменьшен до 10°, КИМ достигает 85%, скорость частиц составляет 140…500 м/с, степень окисления стального покрытия — 2,1…2,9%, пористость — 2%. В среднем уровень параметров на 40% выше в сравнении как с отечественными, так и с зарубежными ДМ-установками [8–10] (рисунок 4). При этом производительность и тепловая эффективность процесса остаются на уровне ДМ. Результаты промышленных испытаний показали, что для большой группы покрытий ка-

чество металлических износостойких и антикоррозионных АДМ-покрытий находится на одном уровне с плазменными покрытиями. Как показал опыт, затраты по организации участка АДМ-восстановления деталей в среднем окупаются в течение полугода.

Рис. 3. АДМ-напыление стали

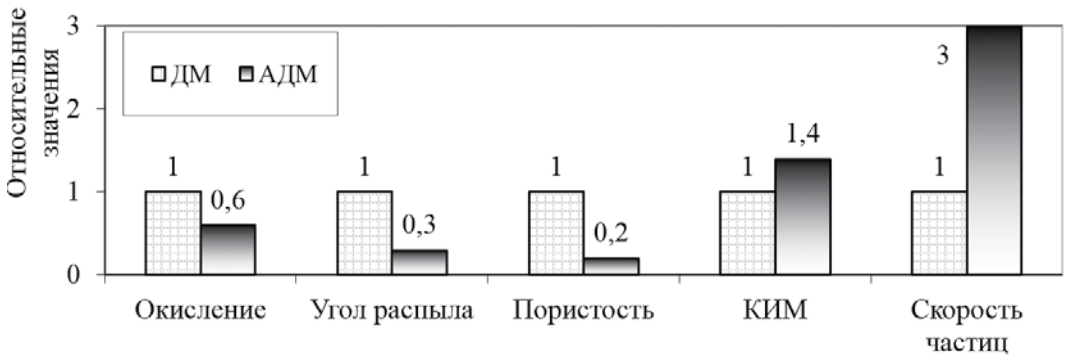


Рис. 4. Сравнение параметров ДМ и АДМ

АДМ позволяет наносить покрытия из стали, бронзы, цинка, алюминия, нихрома производительностью до 18 кг/ч. Была разработана гамма экономнолегированных износо- и жаростойких порошковых проволок на основе железа, покрытия из которых отличаются стойкостью к износу при температурах до 200 °С (микротвёрдость 500…700 HV100), к износу до 500 °С, газовой коррозии до 700 °С [11, 12]. При этом адгезионная прочность по методике «на срез» выше, чем у нихрома на 10…15%, и в 3 раза в сравнении с 08Г2С.

АДМ-процесс сочетает высокую производительность — в 2–5 раз выше, низкие удельные затраты — в 4…10 раз ниже, при защите от износа и атмосферной коррозии качество покрытий одного уровня в сравнении с другими способами ГТН (плазменное, ГПС/СГВ). Это делает его предпочтительным при нанесении защитных покрытий для широкого круга деталей.

На участке газотермического напыления (Машпром — Уральский институт сварки-Металлургия) успешно восстанавливают шейки валов под подшипники скольжения, качения, подшипниковые гнёзда, плунжеры гидроцилиндров, наносят антикоррозионные покрытия из Al, Zn, коррозионностойких и жаропрочных сталей, изготавливаются биметаллические детали «сталь-бронза», «сталь-баббит» (рисунок 5). Как видно, возможности АДМ позволяют закрыть проблемы восстановления широкого спектра деталей, в том числе больших размеров и массы.

В последнее десятилетие быстро развивается группа газопламенных высокоскоростных методов нанесения порошковых покрытий, объединённых в английском языке терминами HVOF/HVAF (High Velocity Oxy/Air-Fuel), русский аналог которых ГПС/СГВ (газопламенное сверхзвуковое/сверхзвуковое газовоздушное). Качество ГПС/СГВ покрытий, исключая оксиды, аналогично альтернативным покры-

тиям (детонационное, плазменное, холодное газодинамическое). Для ГПС/СГВ характерно, что температура частиц распыляемого материала близка к точке плавления основных металлов, а их скорости выше в сравнении с другими методами (рисунок 6). Это позволяет снизить насыщение распыляемых частиц газами атмосферы при обеспечении высокого импульсного давления при ударе частиц о поверхность основы. В результате структура покрытия сочетает низкие пористость и степень окисления с высокой адгезионной прочностью (80…150 МПа).

Рис. 5. Характерные примеры АДМ-напыления:
а) Поворотный круг трубоправильного стана, масса 1350 кг; б) шток-поршень гидроцилиндра пресса, L 1090 мм, ∅ 657 мм;
в) резервуар очистного сооружения, г) поршень гидроцилиндра ∅ 280 мм, давление 30 МПа;
д) подшипниковые шиты электродвигателей ∅ 250…1200 мм; е) баббитовое покрытие 5 мм, припуск на обработку 0,5 мм

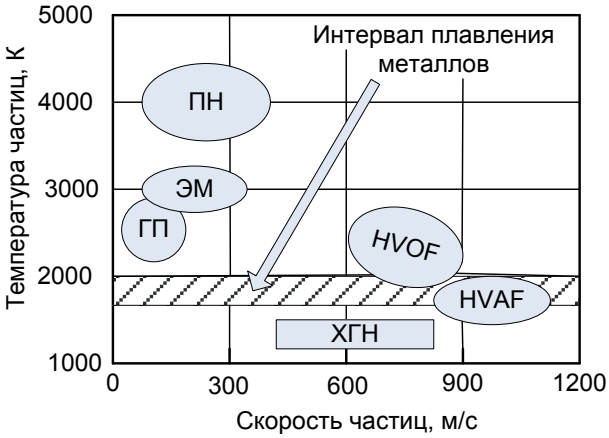


Рис. 6. Сравнительная характеристика способов газотермического напыления по температуре и скорости частиц
Виды напыления: ГП — газопламенное, ЭМ — дуговая металлизация, ПН — плазменное, ХГН — холодное газодинамическое

ГПС/СГВ-покрытия применяют для защиты от контактных нагрузок, агрессивных сред и высоких температур, замены гальванохрома [4, 13]. За рубежом используется несколько сотен ГПС/СГВ установок. Серийно выпускается более десятка ГПС/СГВ систем. На российском рынке представлены рядом фирм — Sabaros, ТЗСП, Уральский институт сварки [14–16].

Анализ публикаций производителей [17–24] показал наличие нескольких видов оборудования, отличающихся по используемым газам, способам охлаждения, подачи порошка и производительности. Базовые ГПС/СГВ-модели — это JP-5000/8000 (Tafa-Praxair), DJ 2600/2700 (Sulzer Metco), Intelli-Jet, M2/M3 (UniqueCoat Technologies) (таблица 1). Все установки стабильны в работе, оснащены блоками дистанционного компьютеризованного управления и соответствуют требованиям электро- и пожаробезопасности. Наиболее технологичны установки Intelli-Jet, M2/M3. Они не требуют использования кислорода в качестве окислителя, водяного охлаждения.

Таблица 1. Расход материалов за 1 час работы

Материалы		Intelli-Jet, M2/M3	JP-5000	DJ2700
Кислород, м³		–	60	18
Сжатый воздух, м³		300	–	23
Топливо	Вид	Пропилен	Керосин	Пропилен
	Расход, кг	30	21	17
Азот, м³		0,96	1,2	1,08
Вода на охлаждение, м³		–	1	0,72

Указанное оборудование обеспечивает показатели качества покрытий примерно одинакового уровня: пористость < 0,2%, адгезионная прочность > 70 МПа, содержание кислорода в покрытии < 1%.

Применительно к распылению порошка WC-10Co-4Cr фракции (–45+10) мкм сравнение параметров показало ряд отличий (рисунок 7).

М3 на рабочей дистанции обеспечивает максимальные скорости частиц (выше в 1,3…1,5 раза) при их минимальном нагреве (рисунок 7а, 7б). При этом максимальные температуры частиц на 100 градусов ниже точки плавления матрицы сплава — кобальта. Такое соотношение кинетической и тепловой энергии частиц при ударе о подложку благоприятно для снижения термических напряжений в покрытии и окисления частиц. Установки IJ, М3 и DJ2700 обеспечивают наивысший КИМ, однако производительность напыления IJ и М3 выше в 2…2,5 раза (рис. 7в, 7г). Совместное влияние высоких КИМ и про-

изводительности, а также соотношение затрат на расходные материалы обусловливает для IJ и M3 снижение в 1,6…2,5 раза относительной стоимости покрытий (рисунок 8).

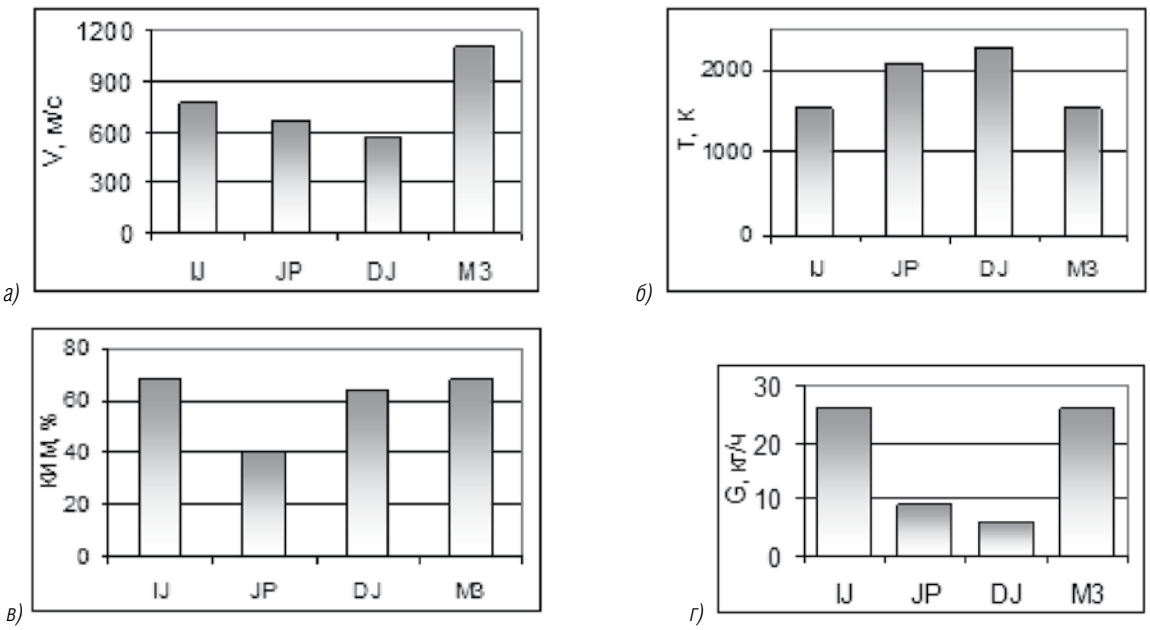


Рис. 7. Выходные параметры базовых ГПС/СГВ-установок (средние значения):
а) скорости частиц; б) температуры частиц; в) КИМ; г) производительности

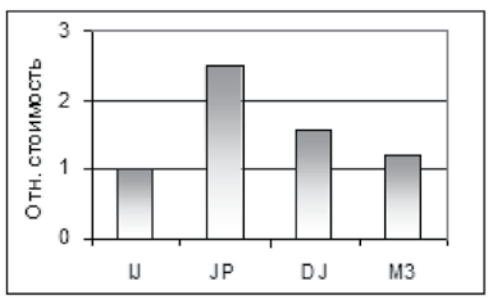


Рис. 8. Относительные затраты на выполнение ГПС/СГВ-процесса

Пистолет M3 (рисунок 9) обеспечивает скорости частиц 1000… 1200 м/с. Это примерно вдвое выше, чем у предыдущих HVAF-моделей, таких как M2 и SB9500, и у базовых HVOF-моделей (JP-5000, DJ 2600/2700).

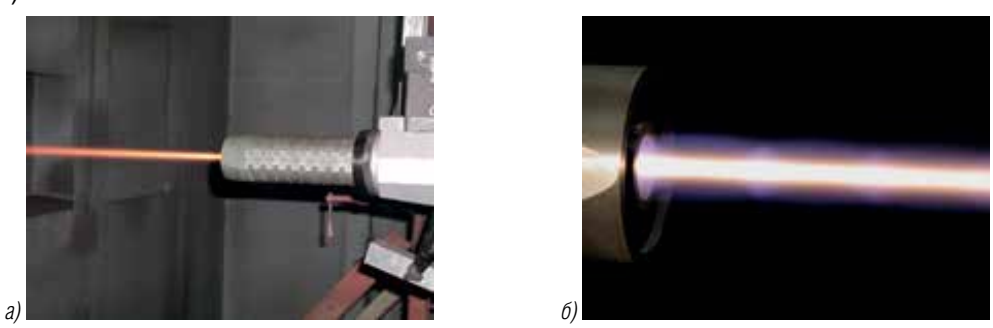
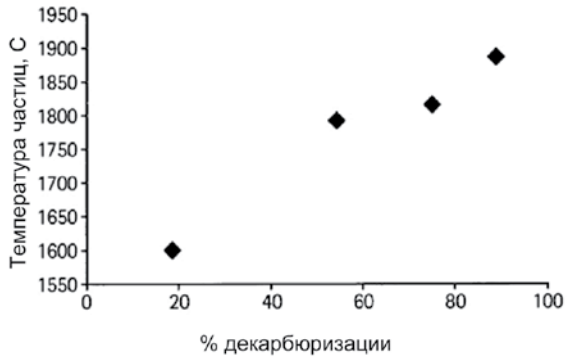
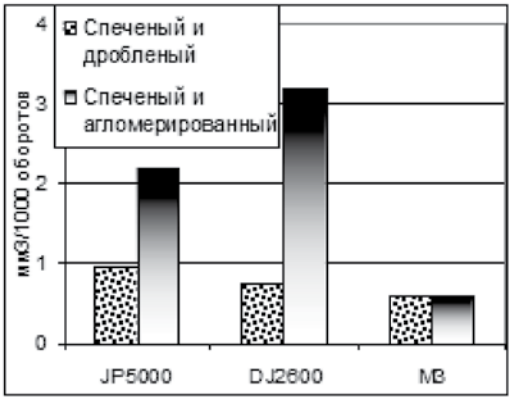


Рис. 9. Пистолет M3 в работе, порошок WC-Co-Cr 86-10-4.
а) общий вид, б) вид распыляемой струи

Пониженная в сравнении с HVOF температура частиц обуславливает снижение декарбюризации первичных карбидов (WC) в керметах (рисунок 10а). Это приводит к повышению износостойкости HVAF-покрытий в сравнении с базовыми HVOF-моделями, где распыляемый порошок нагревается до более высоких температур (рисунок 10б).



а)



б)

Рис. 10. а) Изменение доли декарбюризированных первичных карбидов WC в зависимости от температуры нагрева частиц; б) Сравнительный износ HVAF- и HVOF-покрытий, WC-10Co-4Cr, абразивный износ по схеме «резиновый диск — образец», ASTM G65, абразив корунд 360…500 мкм

Высокие характеристики HVAF-покрытий позволяют успешно их использовать для защиты от нагрузок, характерных в металлургии — жёсткий износ и агрессивное воздействие (рисунок 11). Из примеров также видно, что возможно расширение конструктивных и технологических решений. Детали из легкого алюминиевого сплава с СГВ-покрытием обеспечивают высокую износостойкость (рисунок 11в). Комбинированное покрытие (стальное АДМ-покрытие до 6 мм + высокотвердое СГВ-покрытие 0,3 мм) обеспечивает как восстановление геометрических размеров, так и повышенную износостойкость.

а)

б)

в)

г)

д)

е)

Рис. 11. Характерные примеры СГВ-покрытий:

а) Оправка для шаблонирования труб: толщина 0,3 мм, твердость 68-70 HRC, ресурс в сравнении с закаленной увеличен в 15 раз.

б) Экран сепарационный для подготовки угля: снижение износа в 8 раз в сравнении с закалённым.

в) Накладная пластина из Al сплава установки неразрушающего контроля труб. Толщина 0,25 мм, твердость 68-70 HRC, ресурс увеличен в 50 раз.

г) Стенка кристаллизатора МНЛЗ. Повышение ресурса в 3–12 раз в сравнении с базовым вариантом (стенка с гальванопокрытием);

д) Седло гидроклапана (транспортировка нефти). Среды: абразив, коррозионные реагенты, T > 600°C, давление > 130 МПа.

е) Барабан стана волочения проволоки: восстановление износа до 6 мм (стальное АДМ-покрытие), поверхностное СГВ-покрытие 0,3 мм, твердость 1170HV, в течение 2 лет работы износ отсутствует

Для большеразмерных конструкций, подверженных износу по всей поверхности, разработана и реализована методика изготовления изделий из сталей Hardox, сочетающих износостойкость, в том числе и при повышенных температурах, и технологичность при изготовлении. В частности:

- выработаны рекомендации по эффективному применению изделий из стали Hardox;
- разработана и реализована технология изготовления высокоточных заготовок, обеспечивающая отсутствие собственных деформаций, напряжений и изменений структуры стали на основе автоматической гидроабразивной резки;
- разработана технология сварки деталей из стали Hardox характерных толщин 4–40 мм.

Для сталей Hardox характерны высокие значения твердости, прочности, ударной вязкости до 450 °С. Разработана также сталь Hardox HiTemp для эксплуатации в условиях высоких температур (от 300 до 500 °С) при сохранении всех свойств (рисунок 12).

Рис. 12. Применение футеровки Hardox HiTemp в аглодоменном производстве

Все данные марки сталей технологичны: возможно выполнять сварные соединения без образования трещин (эквивалентный углерод 0,3–0,5) и изготавливать высокоточные заготовки без изменения структуры зоны реза. Это сочетание позволяет изготавливать изделия для характерных применений в металлургии (таблица 2).

Таблица 2. Механические свойства и назначение характерных сталей Hardox [25]

Индекс сталей Hardox	$\sigma_в$, МПа	Твердость, НВ	Вязкость разрушения при –40 °С, кДж/м²,	Макс. Т эксплуатации, °С	Назначение
450	1200	425–475	35	250	Кузова самосвалов, контейнеры, дробилки, просеиватели, загрузочные устройства, мерные бункеры, скиповые подъемники, режущие кромки, конвейеры, ковши, ножи, шестерни, колеса цепной передачи
500	1200	470–530	30	250	Дробилки, просеиватели, загрузочные устройства, мерные бункеры, скиповые подъемники, режущие кромки, конвейеры, ковши, ножи, шестерни, колеса цепной передачи
550	1200	525–575	30	250	Втулки, режущие лезвия с болтовым креплением, сменные накладки, скиповые подъемники, желобы, загрузочные устройства, просеиватели, режущий инструмент, дробилки, измельчители, молоты, ножи
HiTuf	980	310–370	95	450	Режущие кромки, инструменты для демонтажа и рыхлители
HiTemp	1250	375–425	60	500	Футеровки и различные изделия для аглодоменного, сталелитейного, цементного производства, асфальтовых заводов и проч.

Для эффективного продвижения продукта компания «Машпром» подписала соглашение о сотрудничестве с компанией-изготовителем высокопрочных листов Hardox SSAB Oxelösund AB (Швеция). Это обеспечило применение наиболее эффективных материалов для каждого конкретного случая, возможность технической поддержки при изготовлении деталей и снижение стоимости для конечного потребителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для нанесения износо- и коррозионностойких газотермических покрытий на детали металлургического оборудования широкого спектра рационально по критериям производительности, экономичности и технологичности использовать сочетание активированной дуговой металлизации и сверхзвукового газовоздушного напыления. Для большеразмерных конструкций, подверженных износу по всей поверхности, эффективно применение сталей Hardox. Соответствующие технологии и методики разработаны, освоены и успешно применяются в компании «Машпром».

Список литературы

1. Kay Ch. M. Thermal Spray Applications in the Steel Industry: in the ASM Handbook, Volume 5A, Thermal Spray Technology // ASM International, 2013, p. 324–327.
2. Thermal Spraying Technology and Its Applications in the Iron & Steel Industry in China / R. L. Hao // Global Coating Solutions: proc. of ITSC 2007. (Ed.) B.R. Marple, May 14–16, 2007 (Beijing, China), ASM International 2007, p. 291–296.
3. Харламов Ю.А. Газотермическое напыление покрытий и экологичность производства, эксплуатации и ремонта машин // Тяжёлое машиностроение, 2000, № 2, с. 10–13.
4. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. — М.: Физматлит, 2010, 538 с.
5. Коробов Ю.С. Повышение срока службы деталей сверхзвуковым газопламенным напылением.// Тяжёлое машиностроение. — 2006. № 7, с. 34–36.
6. Handbook of Thermal Spray Technology//Ed. by J. R. Davis, ASM International 2004.
7. Коробов Ю.С., Прядко А.С. Активированная дуговая металлизация — новый шаг в защите деталей от износа и коррозии. // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2005. № 10, с 38–40.
8. Arc Sprayed Steel: Microstructure in Severe Substrate Features/A.P. Newbery, P.S. Grant//Journal of Thermal Spray Technology. 2009 — Vol. 18(2). — P. 256–271.
9. Investigation about the Chrome Steel Wire Arc Spray Process and the Resulting Coating Properties / J. Wilden, J.P. Bergmann, S. Jahn, S. Knapp, F. van Rodijnen, and G. Fischer//Journal of Thermal Spray Technology, 2007 — Vol. 16(5-6). — P. 759–767.
10. ЭМ-14М. Паспорт. Барнаул, 1991.
11. Коробов Ю.С., Шумяков В.И., Vuoristo P. и др. Анализ влияния иттрия и бора на свойства жаростойких металлизационных покрытий из порошковых проволок вида Fe-Cr-Al // Тяжелое машиностроение, 2018, № 7–8, с. 7–14.
12. Коробов Ю.С., Шумяков В.И., Балин А.Н. и др. Порошковые проволоки для износо- и жаростойкой наплавки и напыления // Автоматическая сварка, 2017, № 10, с. 62–63.
13. Vardelle A., Moreau Ch., Akedo J. et. al. The 2016 Thermal Spray Roadmap // JTST, 2016, 25 (8), p. 1376–1440.
14. http://www.sulzermetco.ru/
15. http://www.tspc.ru/
16. http://ural-welding.ru/
17. HVOF-solutions: Информационный бюллетень // Sulzer Metco — 2008.
18. JP-5000, the HVOF of the 21st century / M.J. Breitsameter, M. Prosperini // 4th HVOF Colloquium at Erding/ Munchen — Bavaria — Nov 13–14. 1997. — P. 119–125.

19. Praxair surface technologies — TAFA: HP/HVOF equipment solutions. 2009.
20. Барановский В. HVAF — оборудование сверхзвукового газовоздушного напыления // Термическое напыление — современное состояние: Материалы межд. научн.-практ.семинара. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ 2010, Екатеринбург: УГТУ-УПИ. — 2010. С. 4–30. [Электронный ресурс]: Режим доступа http: //study.ustu.ru/view/aid_view.aspx?AidId=9563
21. AC-HVAF Process Information: Информационный бюллетень.//UniqueCoat Technologies, USA. — 2010.
22. A Comparison of HVOF Systems — Behavior of Materials and Coating Properties/H. Kreye//4th HVOF Colloquium at Erding / Munchen — Bavaria — Nov. 13–14. 1997. — P. 13–21.
23. Evaluation of modern HVOF systems concerning the application of Hot corrosion protective coatings / Fr.-W. Bach etc. // Proc of ITSS'2003, China. 2003, p. 10–25.
24. Comparison of Operating Characteristics for Gas and Liquid Fuel HVOF Torches / W. Rusch // Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions: proc. of ITSC 2007 Pub. Materials Park, Ohio, USA, (China, Beijing), ASM International, 2007, pp. 572–57.
25. https://www.ssab.com/products/brands/hardox

С.Н. Клюкин, ПАО «НЛМК»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОКСА ОТ ЕГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

С целью определения ценности класса крупности кокса для доменной плавки необходимо провести их анализ для установления механической прочности и истираемости.

Для определения механической прочности фракций отбирали согласно ГОСТ 23083-78 среднесуточную пробу валового кокса «сухого» тушения.

Отобранную пробу кокса рассеяли по крупности на пятиситном грохоте с получением следующих фракций: 80 мм и более, 60–80 мм, 40–60 мм, 25–40 мм, 10–25 мм, 0–10 мм. Фракции 0–10 мм и 10–25 мм в дальнейшей работе не использовали.

Каждую из полученных фракций металлургического кокса подвергали испытанию в Микум-барабане. При этом испытании пробу фракции кокса массой 50±0,5 кг загружали в Микум-барабан, избегая дробления кокса при загрузке. Вращали барабан с постоянной скоростью 25±1 мин$^{-1}$ до 100 полных оборотов.

Во фракции кокса 25–40 мм и исходном металлургическом коксе определяли показатели индекса дробимости (M_{25}) и истираемость (M_{10}) согласно ГОСТ 5953-93. После 100 оборотов Микум-барабана кокс выгружали в поддон, а затем рассевали на штампованных ситах с квадратными ячейками 25х25 мм и 10х10 мм.

Для фракции кокса 40–60 мм определяли показатели M_{40} и M_{10}, для фракции кокса 60–80 мм определяли показатели M_{60} и M_{10}, для фракции кокса 80 мм и более определяли показатели M_{80} и M_{10}.

Показатели M_{40}, M_{60} и M_{80} — это процентное содержание испытуемой пробы, оставшейся на контрольном сите с размером отверстий соответственно 40х40 мм, 60х60 мм и 80х80 мм после 100 оборотов барабана. Результаты проведенных механических испытаний фракций кокса и их технический анализ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты механических испытаний фракций кокса и их технический анализ

Наименование показателя	Фракция металлургического кокса				Исходный кокс из пробоотборника со всеми фракциями
	80 мм и более	60–80 мм	40–60 мм	25–40 мм	
M_{10} (1 апробирование)	10,8	8,7	7,6	7,6	8,0
M_{10} (2 апробирование)	10,2	8,6	7,4	7,2	7,9
Среднее M_{10}	**10,5**	**8,7**	**7,5**	**7,4**	**8,0**
ΔM_{10} к исходному коксу	**2,5**	**0,7**	**–0,5**	**–0,6**	
M_{25} (1 апробирование)	84,8	87,3	87,9	84,1	86,4
M_{25} (2 апробирование)	85,4	87,5	88,3	85,6	86,5
Среднее M_{25}	**85,1**	**87,4**	**88,1**	**84,9**	**86,5**
ΔM_{25} к исходному коксу	**–1,4**	**0,9**	**1,6**	**–1,6**	
M_{40} (1 апробирование)	–	–	53,6	–	
M_{40} (2 апробирование)	–	–	51,6	–	
Среднее M_{40}	**–**	**–**	**52,6**	**–**	
M_{60} (1 апробирование)	–	21,2	–	–	
M_{60} (2 апробирование)	–	21,1	–	–	
Среднее M_{60}	**–**	**21,2**	**–**	**–**	
M_{80} (1 апробирование)	8,5	–	–	–	
M_{80} (2 апробирование)	10,7	–	–	–	
Среднее M_{80}	**9,6**	**–**	**–**	**–**	
Зольность фракции кокса (A^d)	10,7	10,8	10,8	10,4	10,7
Выход летучих веществ (V^{daf})	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7
Содержание серы (S^d_t)	0,74	0,73	0,74	0,73	0,73

В послебарабанной пробе фракции кокса 80 мм и более определяли гранулометрический состав путем рассева на ситах с размером ячеек 10х10 мм, 25х25 мм, 40х40 мм, 60х60 мм, 80х80 мм. Гранулометрический состав после механического испытания фракции кокса 80 мм и более и исходного кокса со всеми фракциями представлены в таблице 2.

При сравнительном анализе с исходным коксом с пробоотборника наилучшими показателями истираемости (M_{10}) обладают фракции кокса 40–60 мм (M_{10}=7,5%, ΔM_{10}=–0,5%) и 25–40 мм (M_{10}=7,4%, ΔM_{10}= –0,6%). Более низким качеством по истираемости в сравнении с исходным коксом обладают фракции кокса 80 мм и более (M_{10}=10,5%, ΔM_{10}=2,5%) и 60–80 мм (M_{10}=8,7%, ΔM_{10}=0,7%) (таблица 1, рисунок 1).

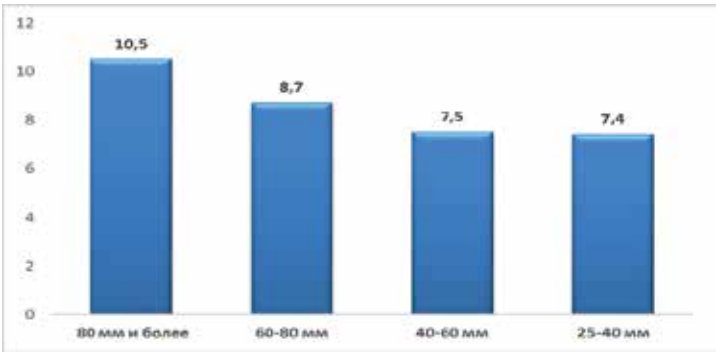


Рис. 1. Истираемость (M_{10}) фракций металлургического кокса, %

Наиболее высокими значениями показателей индекса дробимости M_{25} обладают фракции кокса 60–80 мм (M_{25}=87,4% и ΔM_{25}=0,9%), 40–60 мм (M_{25}=88,1%, ΔM_{25}=1,6%). Снижение значений показателей индекса дробимости M_{25} наблюдается для фракций кокса +80 мм (M_{25}=85,1%, ΔM_{25}=–1,4%) и 25–40 мм (M_{25}=84,9%, ΔM_{25}=–1,6%) (таблица 1, рисунок 2).

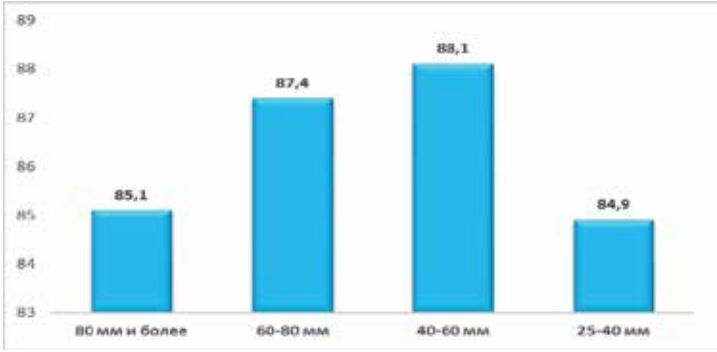


Рис. 2. Индекс дробимости (M25) фракций металлургического кокса, %

В случае увеличения в металлургическом коксе фракции 80 мм и более происходит значительное ухудшение качества кокса как по показателю M_{25}, так и по M_{10}. Чем крупнее кокс, тем он менее прочный и более трещиноватый, а потому при опускании его от колошника в горн образуется много мелочи.

При увеличении в металлургическом коксе долевого участия фракции 60–80 мм показатель M_{25} улучшается, а истираемость M_{10} ухудшается.

Наиболее ценной с точки зрения положительного влияния на показатели механической прочности металлургического кокса является фракция 40–60 мм: чем большее в коксе долевое участие данной фракции, тем прочнее кокс.

При увеличении в металлургическом коксе долевого участия фракции 25–40 мм показатель M_{25} ухудшается, а истираемость M_{10} улучшается.

На основании полученных результатов можно сделать обобщённый вывод о том, что кокс фракции 25–40 мм уступает по своим физико-механическим свойствам коксу фракций 40–60 мм и 60–80 мм, но предпочтительнее кокса фракции 80 мм и более.

Показатели технического анализа: содержание золы, выход летучих веществ, содержание серы в разных фракциях, находятся примерно на одинаковом уровне.

Гранулометрический анализ кокса, образовавшегося после 100 оборотов в Микум-барабане фракции 80 мм и более, показал, что эта фракция металлургического кокса разрушается, в основном, с образованием классов 60–80 мм (33,7%), 40–60 мм (29,5%) и несколько меньшего количества классов 25–40 мм (12,3%), 0–10 мм (10,5%) (таблица 2, рисунок 3).

Таблица 2. Результаты рассева кокса по фракциям

Наименование кокса		Фракция кокса					
		80 мм и более	60–80 мм	40–60 мм	25–40 мм	10–25 мм	0–10 мм
Исходный кокс из пробоотборника со всеми фракциями	1 анализ	6,6	35,7	41,7	13,7	1,1	1,2
	2 анализ	7,6	33,2	40,6	14,7	1,9	2,0
	Среднее	**7,1**	**34,5**	**41,1**	**14,2**	**1,5**	**1,6**
Фракция 80 мм и более после Микум-барабана	1 анализ	8,5	32,8	31,7	11,9	4,5	10,8
	2 анализ	10,7	34,6	27,4	12,7	4,4	10,2
	Среднее	**9,6**	**33,7**	**29,5**	**12,3**	**4,4**	**10,5**

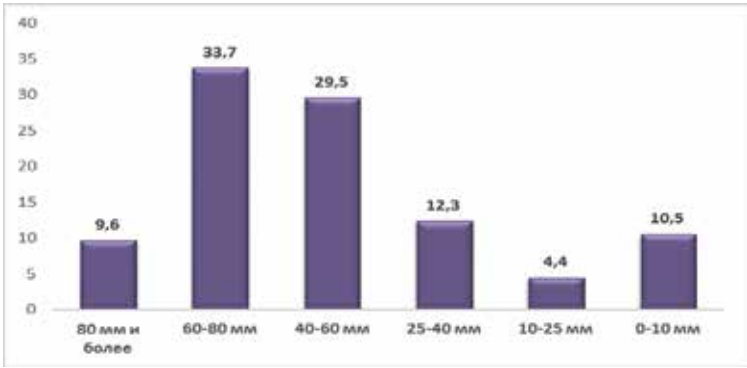


Рис. 3. Гранулометрический состав фракции кокса 80 мм и более, %

На основе сравнительного анализа показателей механической прочности M_{80}=9,6% для фракции кокса 80 мм и более, M_{60}=21,2% для фракции кокса 60-80 мм, M_{40}=52,6% для фракции кокса 40–60 мм, M_{25}=84,9% для фракции кокса 25–40 мм можно сделать следующее заключение: чем больше размер куска кокса, тем меньшая доля исходного класса кокса сохраняется и больше вероятность его разрушения при воздействии одинаковых механических нагрузок.

Основываясь на полученных результатах, отмечено, что с точки зрения технологических показателей качества кокса наиболее оптимальными фракциями для выделения их в скиповый кокс являются фракции 60–80 мм и 40–60 мм. Содержание фракции 25–40 мм в скиповом коксе желательно поддерживать на минимально возможном уровне для обеспечения наилучшей газопроницаемости коксовой линзы. Наихудшими показателями обладает фракция кокса 80 мм и более, ввиду этого содержание данной фракции в скиповом коксе необходимо максимально снижать вплоть до полного её удаления.

Приведенные результаты исследования подтверждаются результатами работ, проведенными на других предприятиях черной металлургии [1–2].

ВЫВОДЫ

1. Фракция металлургического кокса 80 мм и более разрушается, в основном, с образованием классов 60–80 мм (33,7%), 40–60 мм (29,5%) и несколько меньшим участием классов 25–40 мм (12,3%), 0–10 мм (10,5%), т.е. распределение данной фракции на более мелкие фракции при разрушении происходит по нормальному (гауссовскому) распределению.
2. При воздействии одинаковых механических нагрузок, чем больше размер куска кокса, тем меньшая доля исходного класса кокса сохраняется и больше вероятность его разрушения.

3. Наиболее ценной с точки зрения положительного влияния на показатели механической прочности металлургического кокса является фракция 40–60 мм, чем большее в коксе долевое участие данной фракции, тем прочнее кокс.
4. Оптимальными фракциями для выделения их в скиповый кокс, имеющими максимально лучшие показатели, являются фракции 60–80 мм и 40–60 мм. Содержание фракции 25–40 мм в скиповом коксе желательно ограничивать, а фракцию 80 мм и более — полностью выделять из скипового кокса.

Список литературы

1. А.В. Емченко, С.А. Медянцев, С.Л. Ярошевский, А.В. Кузин. Исследование прочностных свойств кокса различных классов крупности. Сборник научных трудов ДонНТУ-2012. Серия: Металлургия. 2012.
2. В.П. Лялюк, Е.О. Шмельцер, И.А. Ляхова, Д.А. Кассим и др. Анализ изменения гранулометрического состава кокса на протяжении четверти века на примере бывшего Криворожского коксохимического завода. Кокс и химия. 2013, №12, с. 28–33.

Раздел VIII
АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА И ЖЕЛЕЗА

С.М. Тлеугабулов, Б.С. Тлеугабулов, НАО «Казахский НТУ им. К.И. Сатпаева»
К.Б. Пыхтеева, УрФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина
ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ ПЛАВКА РУДОУГОЛЬНОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ БЕЗ НАУГЛЕРАЖИВАНИЯ 336

В.Е. Рощин, П.А. Гамов, А.В. Рощин, С.П. Салихов, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ)
ПРЯМОЕ И КОСВЕННОЕ КАРБОТЕРМИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ С ПОЗИЦИИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ 342

Л.А. Зайнуллин, А.Ю. Епишин, В.Г. Карелин, Д.А. Артов, ОАО «ВНИИМТ»
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ С ПОЛУЧЕНИЕМ ЖИДКОГО ЧУГУНА 348

Д.В. Мехряков, ОАО «ВНИИМТ»
С.В. Петров, А.И. Харыбин, АО «ОЭМК»
РЕКОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ № 2 АО «ОЭМК» 352

С.М. Тлеугабулов, Б.С. Тлеугабулов,
НАО «Казахский НТУ им. К.И. Сатпаева»
К.Б. Пыхтеева,
УрФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина

ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ ПЛАВКА РУДОУГОЛЬНОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ БЕЗ НАУГЛЕРАЖИВАНИЯ

Наиболее распространенным способом восстановительной плавки железорудного сырья является доменная плавка. Шихта доменной плавки состоит обычно из офлюсованного, окускованного железорудного сырья (агломерата, окатышей) и металлургического кокса в заданных массовых соотношениях. Показатель рудной нагрузки на кокс находится в пределах 3,3–4,0 т/т чугуна. Как видно, на единицу железорудного сырья приходится удельный расход кокса в пределах 0,25–0,30 т/т. При этом такой удельный расход кокса является основным источником энергии для нагрева шихты, восстановления металла и образования расплавов чугуна и шлака. Доменный процесс это уникальный замкнутый цикл, который начинается с вдувания горячего комбинированного дутья (ГКД) снизу печи в фурмы. В фурменной зоне проходит неполное горение топливных добавок и кокса, образование потока горячего восстановительного газа (ГВГ) с температурой в пределах 2000–2200°С. ГВГ является теплоносителем и основным восстановительным реагентом железорудной офлюсованной шихты.

ГВГ как теплоноситель проходит через слой столба шихты с температурой от 2000–2200°С и выходит в колошник с температурой 120–250°С. Достигается степень использования тепловой энергии на уровне 0,88–0,90. Как восстановительный реагент он на входе в слой шихты имеет суммарную концентрацию ($CO+H_2$)=50–52%, а на выходе достигается степень использования восстановительного потенциала на уровне 0,42–0,50. Обработанный колошниковый газ используется как газообразное топливо для нагрева горячего комбинированного дутья (ГКД) до 1200°С. В доменной печи небольшая часть железа и трудно-восстановимые металлы (Mn, Si, Cr, V, Ti) восстанавливаются твердым углеродом кокса. Восстановление происходит в основном в коксовой насадке.

Образующиеся расплавы металла проходят через слой коксовой насадки, где происходит науглероживание металлов и образование чугуна. Именно поэтому металлопродукцией доменной плавки остается чугун.

В этой связи возникает проблема поиска возможных путей восстановительной плавки железорудного сырья без науглероживания металла.

При доменной плавке комплексного железорудного сырья обычно выплавляется природнолегированный чугун с содержанием углерода на уровне 4,2–4,5%. Доменный и другие процессы производства ферросплавов относятся к «коксовой металлургии». Эти сплавы обречены на полное науглероживание. В рудно-термических печах выплавляют высокоуглеродистые ферросплавы с содержанием углерода до 6,0%. Эти сплавы подвергаются вторичному рафинированию для получения низкоуглеродистого ферросплава. В доменном процессе кокс играет роль источника ГВГ, реагента для прямого восстановления железа и трудно-восстановимых металлов (Mn, Cr, V). В электротермическом процессе кокс играет исключительно роль восстановительного реагента. Во всех процессах прямое восстановление металлов реализуется твердым углеродом. Углерод в коксе и угле имеет одинаковое свойство и восстановительный потенциал. Исходя из этого, возможность решения проблемы заключается в разработке технологии восстановительно-плавильных процессов с заменой кокса углем. Примеры использования угля для прямого восстановления металлов имеются и реализованы в производственном масштабе [1, 2, 3]. Проведенные исследования фирмами «Kobe steel Ltd» (Япония) и «Midrex Technologies Inc» по прямому получению железа привели к созданию технологии под названием «FASTMET». Апробация и развитие «FASTMET-процесса» привело к созданию процесса «ITmk3». Продукцией данных процессов является чугун. Была организована технология восстановительной плавки железорудного сырья в условиях замены кокса углем. При этом ограничить науглероживание металла не удалось в связи с отсутствием теоретической основы возможности регулирования расхода углерода на восстановление металла. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований под руководством Тлеугабулова С.М. установлен механизм регулирования расхода углерода исключительно на восстановление металла с учетом последовательно-фазовых превращений оксидов металла [4].

Коксовая металлургия в доменном и электротермическом процессах основана на подготовке и использовании шихты, состоящей из окускованной рудной части и кускового кокса. При загрузке такой шихты в агрегат химические реакции между оксидами металла и твердым углеродом практически не могут протекать в твердофазном состоянии из-за ограниченности контактной поверхности между ними. Прямое восстановление металла углеродом кокса начинается при высокой температуре 1300–1400°С. Рудная часть шихты переходит в расплав и обтекает поверхность кусков кокса. При организации процесса подготовки шихты из дисперсных компонентов шихты (рудной части и угля) и равномерном их смешивании достигается развитая контактная поверхность.

Подготовка шихты может быть организована сразу из дисперсных компонентов, состоящих, в основном, из железорудного концентрата, флюса и углеродсодержащего восстановителя в виде угля. Окомкование данной смеси позволяет получить моношихту и реализовывать процесс восстановительной плавки моношихты [5].

На базе традиционного металлургического комплекса «Доменная печь-конвертер» накоплены огромные массы вторичных сырьевых ресурсов в виде дисперсных металлсодержащих отходов. Использование их в небольших количествах в составе аглошихты не имеет практического значения. Разработка технологии их металлургической переработки является проблемной задачей мирового масштаба.

Настоящая работа посвящена решению поставленной проблемы. Практически на всех металлургических комбинатах, на которых работает комплекс «Домно-конвертер», накоплены и продолжают накапливаться конвертерные и доменные шламы, в составе которых содержится довольно высокая концентрация железа.

Для проведения экспериментальных исследований и разработки новой технологии приняты конвертерные шламы комбината АО «АрселорМиттал Темиртау». Шламы представляют дисперсную массу фракции менее 1,0 мм. Химический состав шлама был определен в зависимости от размера гранулометрических фракций в пределах от +1,0 мм до 0–0,5 мм по восьми позициям и представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав конвертерного шлама АО «АрселлорМиттал Темиртау»

№	Фракции, мм	*,%	Химический состав,%									
			Fe	FeO	MnO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Zn	S	P
1	+1,0	2,02	42,2	43,07	0,96	6,02	0,86	27,56	4,30	0,5	0,01	0,36
2	0,63–1,0	2,75	46,88	55,38	1,46	6,41	0,74	28,25	7,25	0,42	0,01	0,65
3	0,40–0,63	10,81	56,03	68,70	1,26	6,54	0,59	22,44	6,31	0,23	0,01	0,56
4	0,315–0,40	8,42	59,97	72,34	1,43	4,90	0,86	19,81	6,38	0,20	0,01	0,47
5	0,16–0,315	36,33	67,65	83,28	0,80	3,24	0,40	12,96	4,01	0,20	0,02	0,40
6	0,1–0,6	22,55	66,96	73,97	0,72	2,82	0,38	12,95	3,83	0,34	0,02	0,39
7	0,05–0,10	13,32	68,04	78,7	0,60	2,67	0,87	10,11	3,91	0,44	0,02	0,31
8	0–0,05	3,80	47,26	46,85	0,65	1,96	0,37	20,63	6,38	0,5	0,02	0,18
Усредненный химический состав по суммарной массе фракции												
	0–1,0	100,0	63,78	73,8	0,87	3,67	0,53	15,18	6,27	0,30	0,018	0,406
*Массовая доля фракции в процентном выражении												

Железо в шламе составляет высокую концентрацию и на 90% состоит из вюстита (FeO). Содержание фосфора не существенно влияет на организацию восстановительно-плавильного процесса. Конвертерный шлам одновременно содержит высокую концентрацию (CaO). Вредные примеси фосфора и серы находятся в соединении с оксидом кальция в виде фосфата кальция — $3CaO(PO_4)_2$ и сульфида кальция — CaS. При подготовке шихты для выплавки металла отпадает необходимость добавки флюса.

Шихта состоит из двух компонентов: конвертерного шлама и углеродсодержащего восстановительного реагента. В качестве восстановителя использовали Чубаркульский малозольный энергетический уголь, который имеет зольность на уровне 3,5%, летучесть 32%, концентрацию нелетучего углерода на уровне 64%. Для полного удаления летучих уголь подвергли термической обработке. Необходимая масса исходного угля была загружена в герметическую огнеупорную ячейку муфельной печи и нагрета со скоростью 10°/мин до 750–800°С. При этой температуре уголь выдерживали в течении 30 минут до прекращения выделения газа. Обожженную массу угля после охлаждения до комнатной температуры извлекли из емкости и проанализировали состав. Обожженная масса состояла из твердого углерода, золы и серы. Масса имела следующий анализ, %:

C	S	Зола
92,0	0,52	7,48

Восстановительно-плавильный процесс был организован на лабораторном комплексе, представленном на рисунке 1. На установке был реализован полный цикл процессов от подготовки шихты до выплавки металла из нее.

Для организации восстановительной плавки конвертерного шлама определяли стехиометрический расход подготовленного угля на его единицу массы. Восстанавливаемыми оксидами являются FeO, Fe_2O_3, MnO, частично SiO_2 (таблица 1). По разработанной методике с учетом последовательно-фазового превращения металла определили стехиометрический расход угля.

Удельный расход подготовленного угля на единицу шлама составил 0,126 кг/кг.

Смесь шлама и угля массой 2,252 кг состояла из массовых долей шлама $\gamma_{шл}$=0,888 кг/кг и угля $\gamma_{уг}$=0,112 кг/кг. Получен усредненный химический состав рудоугольной смеси:

Fe	FeO	MnO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Zn	S	P	C
56,64	65,53	0,773	3,26	0,47	13,48	5,56	0,27	0,015	0,36	10,30

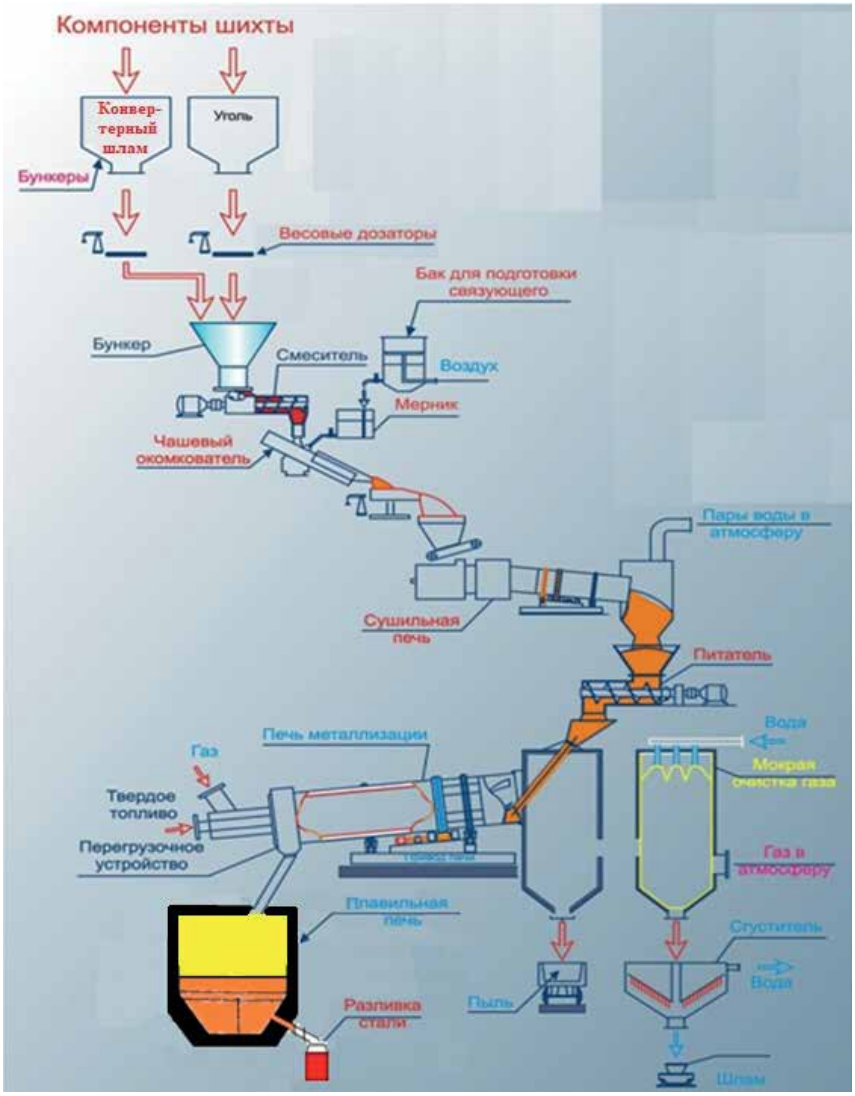


Рис. 1. Восстановительно-плавильный процесс на базе конвертерного шлама

В концентрацию общего железа 56,64% входит железо вюстита FeO=65,53% и гематита Fe_2O_3=8,18%. Содержание углерода 10,3% обеспечивает восстановление железа на 98% и марганца на 75%.

Из полученной смеси на тарельчатом грануляторе подготавливали рудоугольные окатыши фракции 8,0–18,0 мм. Далее окатыши сушили в камерной печи при температуре 350–400°С. После сушки окатыши имели механическую прочность (до 50 кг/ок). Окатыши были подвергнуты двум стадиям обработки:

1. металлизации в трубчатой печи СУОЛ-044/12-М2 при температуре 1000°С;
2. восстановительной плавке металлизованных продуктов в плавильной печи при температуре 1650–1700°С.

Фосфор при температуре металлизации (1000 °С) по условиям термодинамической прочности из фосфата кальция не восстанавливается. Его восстановление протекает при температуре выше 1200 °С. Углерод (10,3%) в рудоугольных окатышах расходовался полностью на восстановление железа и марганца при 1000 °С. При восстановительной плавке не было остаточного углерода на восстановление фосфора из фосфата кальция.

В окатышах содержится необходимое количество углерода-восстановителя и нет необходимости продувки слоя окатышей горячими восстановительными газами.

Для реализации восстановления металлов твердым углеродом нужен не поток ГВГ, а поток газа-теплоносителя, состав которого соответствует равновесному составу прямого восстановления металла.

Образующийся газообразный продукт прямого восстановления разделяется на два потока. Первый поток используется для нагрева высокотемпературного газа-теплоносителя, а второй поток после нагрева вводится в слой в качестве газа-теплоносителя. Такой замкнутый цикл металлизации и плавки рудоугольный окатышей предусмотрен в патенте [6].

По мере расплавления окатышей и закипания расплава при 1600 °С в плавильную печь загружали дополнительное количество металлизованных окатышей. Были проведены три плавки. На каждой плавке выход металла составлял в пределах 150–200 гр.

Химический состав выплавленных образцов металла представлен в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав металла

Образцы стали по порядку	Химический состав, %					
	[C]	[Mn]	[Si]	[S]	[P]	ост. Fe
1 плавка	0,28	0,80	0,11	0,01	0,028	-//-
2 плавка	0,39	0,77	0,10	0,01	0,032	-//-
3 плавка	0,36	0,78	0,09	0,01	0,033	-//-

Как видно, по всем трем плавкам получен расплав стали с содержанием углерода в пределах [C]=0,28–0,38% и марганца [Mn]=0,77–0,80%. Содержание фосфора вполне соответствует требованиям высококачественной стали.

Результаты проведенного комплекса экспериментальных исследований показывают, что продукцией восстановительной плавки железорудного сырья является не только чугун, который стереотипно закрепился в сознании не только практиков, но и научных работников. В основе этого сознания лежит принятое теоретическое положение о понимании прямого восстановления металлов. Принято считать, что газообразным продуктом реакции прямого восстановления металлов является исключительно газ CO.

$$MeO+C=Me+CO \text{ или} \quad (1)$$

$$FeO+C=Fe_{мет}+CO. \quad (2)$$

Сразу скажем: нет! Образование CO или CO_2 зависит от химической прочности оксида. Даже самый низший оксид железа FeO при прямом восстановлении выделяет газ, состоящий из 75%CO и 25%CO_2.

$$5FeO+4C=5Fe_{мет}+3CO+CO_2 \quad (3)$$

Как видно, на газификацию кислорода оксида металла с образованием CO_2 расход углерода в два раза меньше, чем с образованием CO. Именно поэтому при представлении прямого восстановления по реакциям (1)–(2) постоянно допускается избыток углерода и неизбежно наталкиваются на науглероживание металла и образование чугуна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Традиционная технология по комплексу «Доменная печь-конвертер» состоит из двух стадии плавок: 1) восстановительной плавки, которая сопровождается науглероживанием металла и образованием чугуна; 2) окислительной переплавки чугуна, которая сопровождается обезуглероживанием расплава и полным окислением и последующими потерями ценных легирующих металлов.

Разработана и предложена одностадийная восстановительная плавка подготовленного рудоугольного железорудного сырья без науглероживания металла. Восстановительная плавка без науглероживания металла позволяет выплавлять природно-легированную сталь. Исключаются многочисленные издержки производства и потери сопутствующих легирующих элементов из комплексного железорудного сырья.

Список литературы

1. Пат. №2303072. Токуда Кодэи, Кикути Соити, Цуге Осаму. Способ и устройство для восстановленного железа. Россия. Опубл. 20.07.2007 г.
2. Kashiwaya Yoshiaki, Yamaguchi Yasuhide, Kinoshita Hiroshi, Ishii Kuniyoshi. Исследование восстановления гематита, находящегося в контакте с твердым углеродом и анализ его кристаллографической ориентации по отношению к магнетиту. ISLJ Int. 2007, 47. №2. — С. 226–233.
3. Новости черн. Металлургии за рубежом. 2010, № 6. — С. 20–25.
4. Тлеугабулов С.М. Высокотехнологичный восстановительно-плавильный процесс производства стали // ж. Сталь, 2011, № 4. — С. 14–19.
5. Tleugabulov, S.M., Tleugabulov, B.S., Koishina, G.M., Altybaeva, D.K., Tazhiev, E.B. Smelting Reduction of a Monocharge. Scientific and Production Technical Journal Metallurgist (Russia), Vol. 60, Nos. 1–2, May, 2016, P. 31–37.
6. Пат. №31496 Тлеугабулов С.М. Способ восстановительной плавки стали и устройство для его осуществления. С21В 13/00. Заявл. 13.03.2015; Опубл. 15.09.2016. Бюл. №11.

В.Е. Рощин, П.А. Гамов, А.В. Рощин, С.П. Салихов,
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ)

ПРЯМОЕ И КОСВЕННОЕ КАРБОТЕРМИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ С ПОЗИЦИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

«...механизм химических процессов может быть понят лишь на основе физических теорий, описывающих движение реагирующих молекул и осуществляющих акт химической реакции электронов» [1]

Технологии извлечения металлов из руд развиваются уже 3,5 тысячи лет, а существующие теории восстановления появились лишь в середине XX века на основе разработанных в конце XIX века Л. Больцманом, Дж.У. Гиббсом, Ван-дер-Ваальсом, М. Фольмером и другими «газовых» законов химических реакций. Поэтому в основе современной теории металлургических процессов, в том числе твёрдофазных процессов восстановления, лежат молекулярные представления о химических реакциях. Исходя из этих представлений, важнейший в металлургии процесс восстановления металлов твёрдым углеродом из твёрдых оксидов описывается реакциями либо прямого взаимодействия атомов углерода с молекулами оксидов, либо с участием молекул промежуточного газового агента CO [2–5].

Но уже накопилось много экспериментальных фактов, которые не вписываются ни в первый, ни во второй механизм [5, 6]. Кроме того, давно известно, что прямое взаимодействие твёрдых реагентов вследствие ничтожно малого и постоянно нарушаемого контакта твёрдых тел не может обеспечить наблюдаемую на практике кинетику процесса, а восстановительная способность CO недостаточна для восстановления ряда металлов, например, хрома, то есть при косвенном восстановлении не выполняются термодинамические условия. При этом в обоих случаях после образования на поверхности оксида продукта восстановления (металла или карбидов) процесс должен переходить в диффузи-

онный режим и практически останавливаться, чего на практике не происходит. Привлечение к объяснению этой, так называемой, кнудсеновской диффузии газовых молекул по невидимым микропорам не устраняет этого противоречия, так как после выделения металла на поверхности микропор в порах возникала бы та же ситуация (рисунок 1).

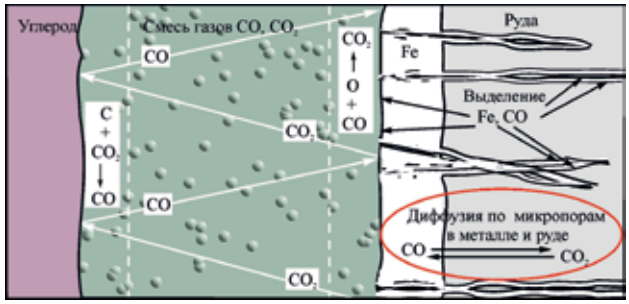


Рис. 1. Движение газовых молекул, описываемое схемой косвенного восстановления

В то же время суть восстановительных реакций заключается не в обмене молекул атомами, поскольку в твёрдых реагентах ни тех, ни других нет, а в приобретении катионами в оксидах руды электронов. В принципе не имеет значения, кто является их поставщиком. Восстановители по отношению к металлу являются лишь внешними источниками электронов. Поэтому и существенно лишь то, как происходит обмен электронами между участниками восстановительного процесса, в том числе при доменной плавке.

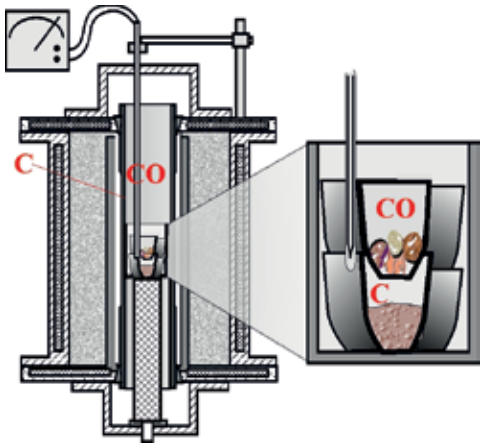


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Для уточнения механизма восстановления мы создавали условия прямого и косвенного восстановления двух металлов — железа и хрома из природных комплексных оксидов — хромшпинелидов двух хромовых руд с разным соотношением хрома и железа в шпинели и одиночных кристаллов шпинелидов, вкрапленных в магнийсиликатную горную породу — дунит. Для эксперимента использовали закрытую печь с графитовым нагревателем (рисунок 2), что гарантировало получение в объёме печи восстановительной атмосферы CO. В рабочий объём установили 6 корундовых тиглей, в которых находились образцы 3-х исследуемых оксидных материалов, причём один образец каждого материала находился в контакте с порошком твердого восстановителя (графита), а второй мог взаимодействовать только с газообразным CO. Печь нагревали до температуры 1300 или 1400°C и выдерживали в течение от 1 до 4-х часов.

Результаты экспериментов представлены на рисунках 3–5. В образцах обеих хромовых руд в атмосфере CO железо частично восстановилось лишь в цементирующей кристаллы хромита силикатной фазе. В то же время в смеси с твёрдым углеродом железо и хром в шпинелидах обеих хромовых руд

восстановились полностью. Разное соотношение содержаний хрома и железа в руде не привело к каким-либо видимым отличиям в результатах восстановления. Таким образом, в условиях эксперимента монооксид углерода не был восстановителем ни для хрома, ни для железа, связанных в комплексный оксид-хромовую шпинель, в то время как оба металла в этом оксиде восстановились полностью твёрдым углеродом.

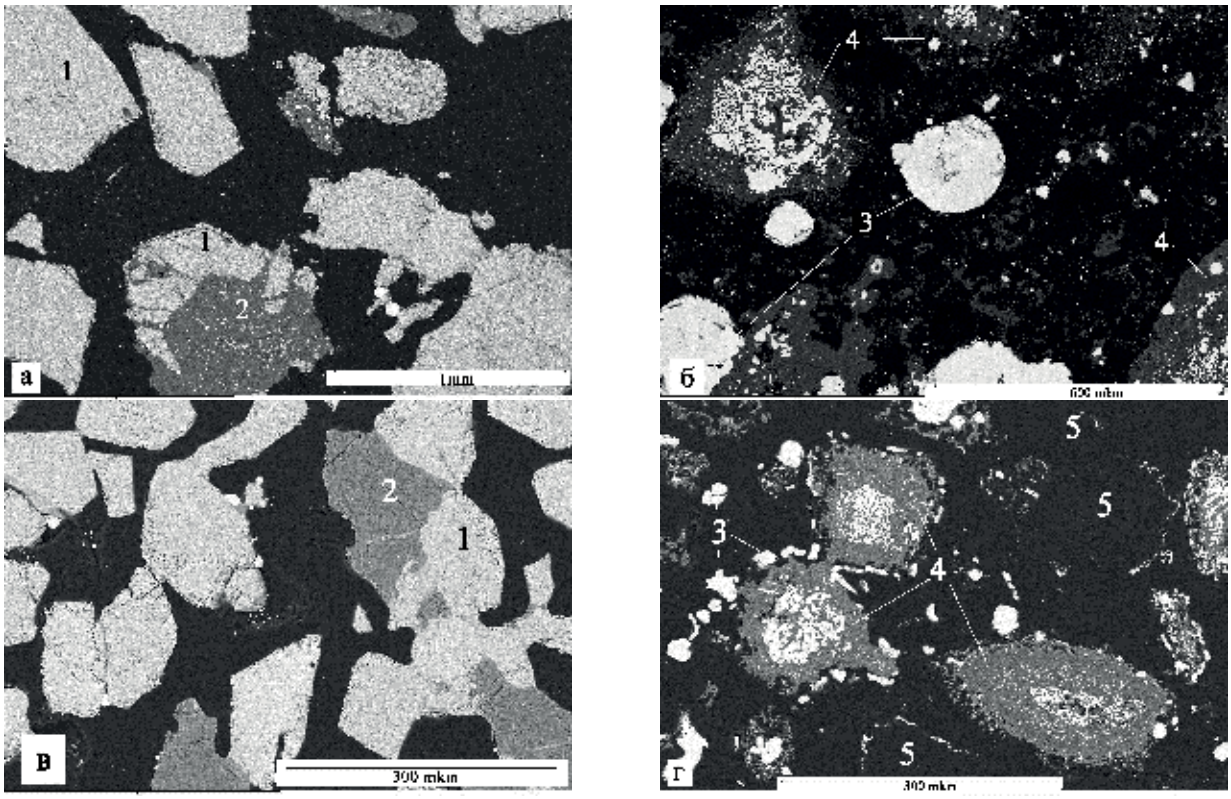


Рис. 3. Преобразования в рудных концентратах в атмосфере CO и смеси с твёрдым углеродом:
1 — зёрна хромита, 2 — цементирующая фаза, 3 — конгломераты карбидов и силицидов, 4 — остатки хромита в виде безуглеродистого феррохрома внутри оксидной фазы из шпинели $MgO{\cdot}Al_2O_3$ и магнезии MgO, 5 — частицы графита в карбидной оболочке

Обращает на себя внимание образование в смеси твёрдых хромитов с твёрдым углеродсодержащим материалом на поверхности и оксидов, и графита оболочек, идеально повторяющих поверхность частиц (рисунок 3). На поверхности оксида — это смесь карбидов $Me_{23}C_6$, Me_7C_3 и Me_3C_2, а на поверхности графита — только карбид Me_3C_2. Такие оболочки не могут быть результатом контактного взаимодействия твёрдых фаз. Их образование свидетельствует о переносе на поверхность руды углерода, а на поверхность графита — хрома и железа через газовую фазу. Но в условиях эксперимента переносчиком углерода, а тем более железа и хрома, CO быть не мог.

Кроме того, такие же оболочки, состоящие из безуглеродистого сплава хрома с железом, образовались на поверхности и кристаллов хромита, вкрапленных в твёрдую силикатную матрицу дунита в его смеси с твёрдым восстановителем (рисунок 5б). В то же время в образцах дунита, подвергавшихся воздействию только восстановительной атмосферы CO, нет признаков восстановления ни хрома, ни железа (рисунок 5в). Поэтому восстановление хрома и железа твёрдым углеродом во вкрапленных кристаллах шпинелида, находящихся на удалении от поверхности возможного контакта углерода с оксидом, тем более образование оболочек, точно воспроизводящих поверхность вкрапленного кристалла, в принципе не может быть объяснено участием и газовой фазы.

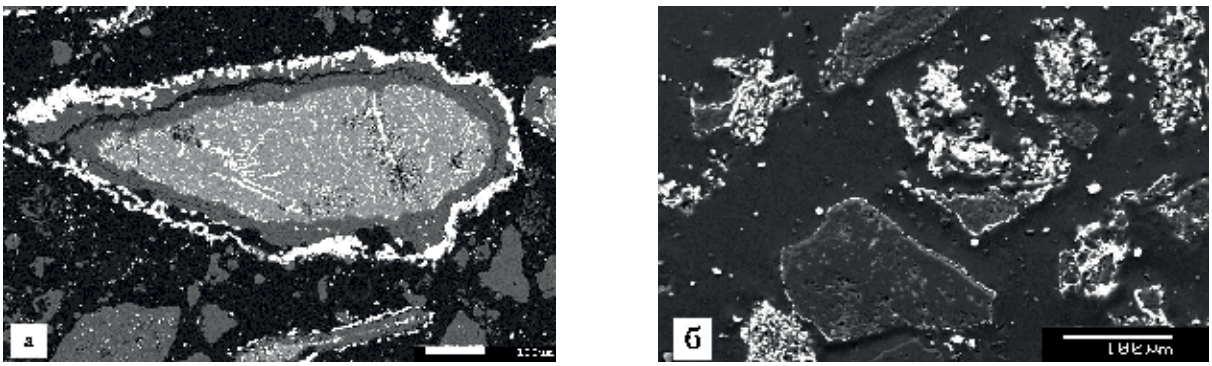


Рис. 4. Карбидные оболочки на поверхности хромита (а) и графита (б)

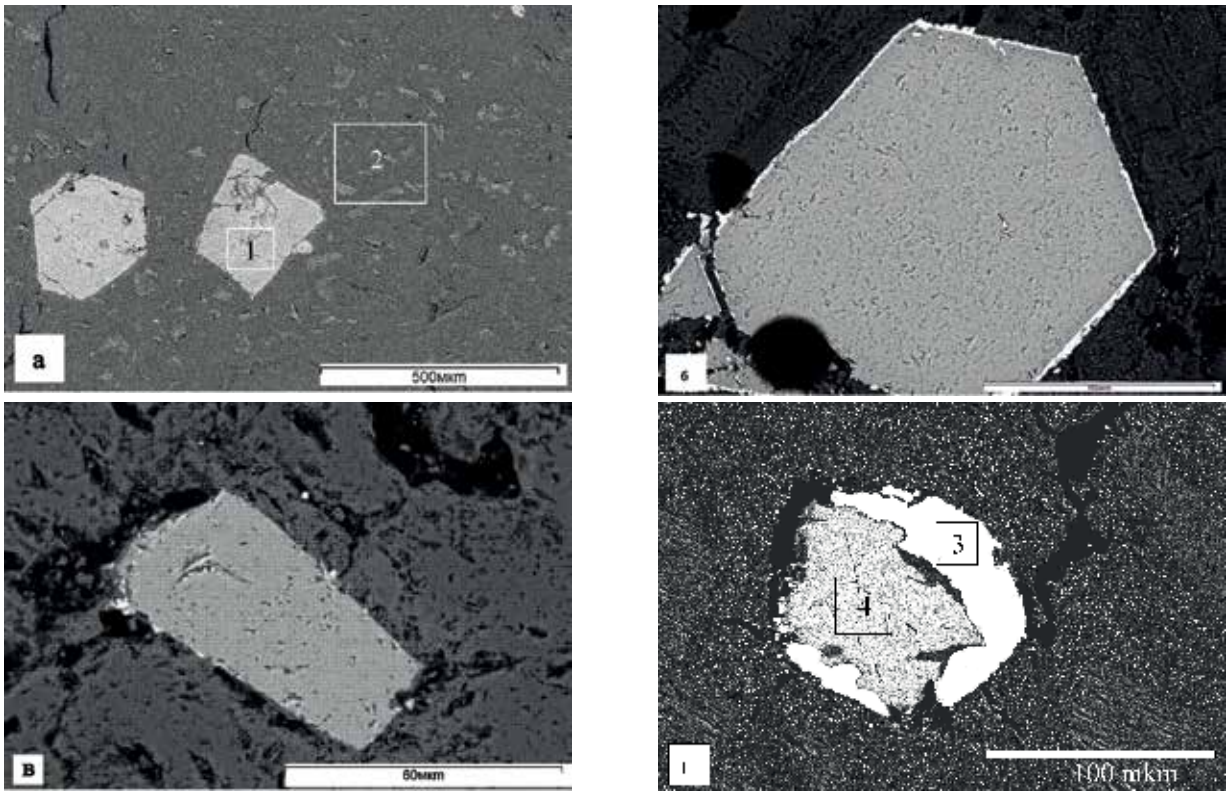


Рис. 5. Преобразования во вкрапленных кристаллах хромита:
а — структура дунита в исходном состоянии (1 — шпинелид, 2 — форстерит), б — образование оболочки безуглеродистого FeCr на поверхности хромита, в — кристалл после выдержки дунита в атмосфере CO, г — кристалл после выдержки дунита в смеси с графитом (3 — безуглеродистый сплав Fe-Cr, 4 — остаток шпинели)

Таким образом, результаты экспериментов свидетельствуют о переносе через газовую фазу не только восстановителя на поверхность оксида, но и фрагментов оксида на поверхность твёрдого восстановителя, распространение восстановительного процесса в объеме, несомненно, плотных оксидных фаз и выделение металла на поверхности вкрапленных в эти фазы кристаллов шпинели. Они не могут быть объяснены с позиций ни прямого, ни косвенного восстановления, базирующихся на молекулярных представлениях.

Это естественно, поскольку в твёрдых фазах нет ни атомов, ни молекул, а есть кристаллическая решётка, образованная плотнейшей упаковкой анионов и находящимися («спрятанными») в тетра- и окта-

порах между анионами более мелкими катионами. Поэтому твёрдофазное восстановление в принципе не может быть обусловлено взаимодействием атомов или молекул. При любом варианте восстановления восстановитель взаимодействует на поверхности оксида не с молекулами, а с анионами кислорода его кристаллической решётки, в частности по реакции $C + O^{2-} \rightarrow CO\uparrow + (Va + 2e)$. Продуктами такого взаимодействия являются молекулы CO, удаляемые в газовую фазу, и анионные вакансии V_a^{2-}, рассеиваемые в анионной подрешётке оксида (рисунок 6). Поскольку в любой системе всегда соблюдается равенство положительных и отрицательных зарядов, то в анионной вакансии должны остаться два свободных («лишних») электрона, компенсирующие отсутствие аниона. Движение электронов с вакансией можно рассматривать как перемещение катионов пониженного заряда или даже как перемещение атомов, но без движения самих катионов или атомов [7–11].

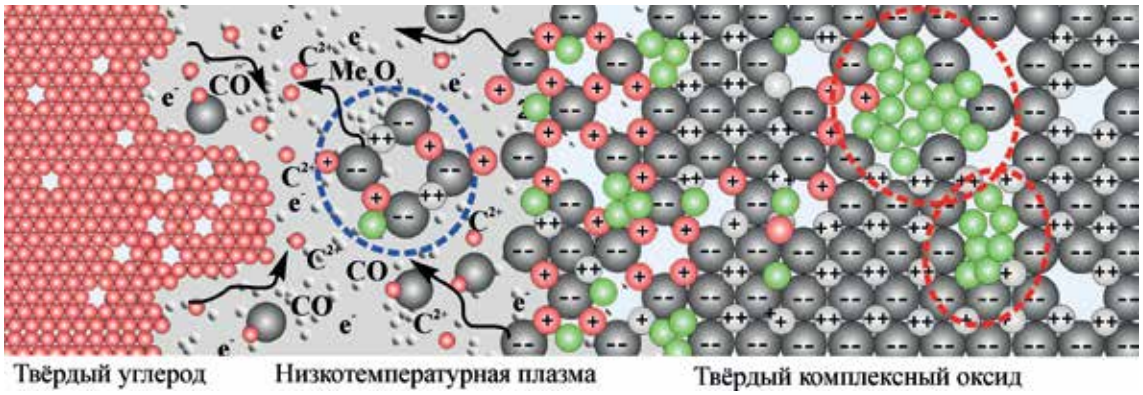


Рис. 6. Схема электро- и массопереноса между твёрдым восстановителем и твёрдым оксидом, перемещения «лишних» электронов и выделения металла внутри куска комплексного оксида

Эксперимент показал, что вакансии легко пересекают границы разных оксидных фаз в одном образце, образуя в, по-существу, общей анионной подрешётке всех оксидных фаз раствор заряженных вакансий. При достижении раствором критической концентрации происходит его распад, то есть слияние и выделение вакансий в виде анионной пустоты. Образование анионной пустоты происходит там, где находятся катионы, относительно которых химический потенциал свободных электронов способен обеспечить заполнение ими уровня Ферми катионов и формирование металлической фазы. Образование металлической фазы из катионов оксида в анионной пустоте происходит, минуя стадию образования атомов.

Равнодоступность всей поверхности оксида для восстановителя, о чём свидетельствует вид карбидной оболочки на поверхности, свидетельствует о подводе углерода к поверхности оксида через газовую фазу. Контакт твёрдых частиц углерода и оксида мог бы обеспечить подвод углерода, но не мог обеспечить его равномерный подвод ко всей поверхности, и уж тем более к поверхности вкрапленных кристаллов в дуните.

Однако в условиях высокотемпературных металлургических процессов необходимости в непосредственном контакте твёрдых фаз нет. Давно известно, что при температуре восстановления у поверхности твёрдых фаз формируется низкотемпературная плазма, состоящая из электронов, ионов, молекул и их ассоциаций. Видимым проявлением существования плазмы является свечение поверхности нагретых тел, возникающее вследствие рэмиссии электронов. Начальным импульсом к образованию плазмы служит термоэлектронная эмиссия электронов с поверхности углерода, количественно описываемая формулой Ричардсона-Дэшмэна $I_0 = AT^2\exp(-Ф/kT)$, где A — коэффициент, зависящий от состояния поверхности, Ф — работа выхода электрона, k — константа Больцмана.

Образование карбидных оболочек на поверхности твёрдого углерода происходит путём переноса фрагментов кристаллической решётки оксида в виде низших оксидов переменного состава, отрывающихся от разрыхленной кристаллической решётки оксидов.

Таким образом, восстановление металлов в твёрдых комплексных оксидах твёрдым углеродом («прямое восстановление») происходит не в точках контакта твёрдых фаз, а путём переноса атомов

углерода (или ионов и электронов) через низкотемпературную плазму, образования в решётке оксида заряженных электронами анионных вакансий, их рассеивания в решётке оксидов, слияния вакансий и выделения металла в местах, где химический потенциал электронов в вакансиях соответствует уровню Ферми металла. Следовательно, прямое восстановление не требует ни хорошего и постоянного контакта твёрдых фаз, ни подвода восстановителя к месту выделения металла, ни отвода от этого места газообразных продуктов реакции.

В оксидах, образованных одним металлом, в частности, в богатой железной руде, выделение металлической фазы при восстановлении твёрдым углеродом происходит на всей поверхности оксида. Образование на поверхности руды сплошного слоя твёрдых продуктов восстановления (металла или карбидов) сначала тормозит и, в конечном счете, практически останавливает процесс восстановления. Для безостановочного восстановления этот слой необходимо разрушить. Поэтому процесс восстановления должен осуществляться при температуре, превышающей температуру плавления твёрдых продуктов. Плавление и формирование капель из конденсированных продуктов восстановления, их последующее слияние и стекание освобождают поверхность оксида и создают условия для дальнейшего взаимодействия оксида с восстановителем. В восстановительных агрегатах (в доменной и рудотермических печах) — это условие выполняется автоматически, поскольку эти печи одновременно являются и плавильными агрегатами.

Косвенное восстановление с участием монооксида углерода играет в этом процессе заметную роль лишь в тех случаях, когда это возможно по термодинамическим условиям.

Список литературы

1. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия. — М.: Металлургия, 1976. — 520 с.
2. Чуфаров Г.И. и др. Термодинамика процессов восстановления окислов металлов / Г.И. Чуфаров, А.Н. Мень, В.Ф. Балакирев и др. — М.: Металлургия, 1970. — 399 с.
3. Попель С.И., Сотников А.И., Бороненков В.Н. Теория металлургических процессов. — М.: Металлургия, 1986. — 463 с.
4. Дмитриев А.Н., Шумаков Н.С., Леонтьев Л.И., Онорин О.П. Основы теории и технологии доменной плавки. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 545 с.
5. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. — 464 с.
6. Павлов В.В. Несообразности металлургии: научная монография. Уральский государственный горный университет: третье изд., переработанное и дополненное. — Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2013. — 212 с.
7. 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. Roshchin V.E., Roshchin A.V. Selective Reduction of Metals in the Crystal Lattice of Complex Oxides: Physical Principles. Steel in Translation, 2013. Vol. 43, No. 5, pp. 278–287.
8. Рощин В.Е., Рощин А.В. Селективное восстановление металлов в решётке комплексных оксидов // Металлы. — 2013, № 2. — С. 12–20. Roshchin V.E., Roshchin A.V. Selective Reduction of Metals in the Lattice of a Complex Oxide. Russian Metallurgy (Metally), 2013, No. 3, pp. 169–175.
9. Рощин В.Е., Рощин А.В. Физика процессов окисления и восстановления металлов в твердой фазе// Металлы. — 2015, № 3. — С. 19–25. Roshchin V.E., Roshchin A.V. Physics of the Solid Phase Oxidation and Reduction of Metals. Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2015, No. 5, pp. 354–359.
10. Рощин В.Е., Рощин А.В. Общая электронная теория восстановления и окисления металлов. Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XVII Международной конференции: в 2 ч. / под ред. В.Е. Рощина. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. — Ч. 1. — С. 13–24.
11. Рощин В.Е. Теория и технологии переработки комплексных руд с получением первородного железа и оксидных концентратов титана или магния. Металлургия чугуна — вызовы XXI века. Труды VIII Международного конгресса доменщиков. — М.: Изд. дом «Кодекс». — 2017. — С. 571–577.

Л.А. Зайнуллин, А.Ю. Епишин, В.Г. Карелин, Д.А. Артов,
ОАО «ВНИИМТ»

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ С ПОЛУЧЕНИЕМ ЖИДКОГО ЧУГУНА

В ОАО «ВНИИМТ» в последние годы разработан и опробован в лабораторных условиях новый способ прямого получения металла путем восстановления твердым восстановителем в электродуговой печи постоянного тока мелкозернистого материала, включая измельченную руду, концентрат, железосодержащие шламы и т.п. Данная технология позволяет получить чугун с содержанием углерода 3–4% в жидкотекучем состоянии, который может быть сгранулирован, отлит в чушки или переработан в сталь в агрегате ковш-печь из жидкого состояния с минимальными удельными выходами газа и шлака.

Высокие удельные энергетические затраты были и остаются главными недостатками доменного производства. Около 80% от общих затрат энергии потребляет доменная печь совместно с коксохимическим, агломерационным и энергетическим производствами [1]. Процесс восстановления ведется при низкой энергонапряженности, иными словами, при относительно малом количестве энергии, выделяющейся в единице объема рабочего пространства доменной печи — 0,4–1 МВт/м^3. В настоящее время энергоемкость доменно-конвертерного способа производства стали на уровне заготовки в промышленно развитых странах составляет 20–25 ГДж/т [2]. Не стоит забывать и о том, что доменное производство требует использования рудного сырья достаточно высокого качества. А более глубокое обогащение сырьевых материалов и необходимость окускования концентрата приводит к повышению энергозатрат и росту потерь железа с хвостами. Поэтому актуальной задачей ученых металлургов является поиск альтернативных технологий получения железа с максимальным извлечением из минерального сырья, причем без использования дорогостоящего кокса, природного газа, и с наименьшим давлением на экологию. Необходимы технологии

их замены на дешевые и менее дефицитные восстановители, как, например, энергетический уголь, с максимальным извлечением железа из руды и минимальным загрязнением атмосферы.

Во ВНИИМТ в последние годы разработан и опробован в лабораторных условиях новый способ прямого получения металла путем восстановления твердым восстановителем в электродуговой печи постоянного тока мелкозернистого материала, включая измельченную руду, концентрат, железосодержащие шламы и т.п. [3].

Данная технология позволяет получить чугун с содержанием углерода 3–4% в жидкотекучем состоянии, который может быть сгранулирован, отлит в чушки или переработан в сталь в агрегате ковш-печь из жидкого состояния с минимальными удельными выходами газа и шлака.

Печь состоит из корпуса с подовым электродом и подвижного сводового графитированного электрода с центральным каналом, в который непрерывно подается сыпучее исходное сырье с тем или иным содержанием восстанавливаемого металла. Угольно-железорудная шихта готовится практически без флюсов, что позволяет значительно сократить количество шлаков и затрат электроэнергии на получение металла с одновременным его расплавлением. Затраты угля составляют 15–20% в зависимости от содержания восстанавливаемого метала в шихте.

На рисунке 1 показано устройство для реализации восстановительного процесса в дуге с одновременным расплавлением восстановленного металла.

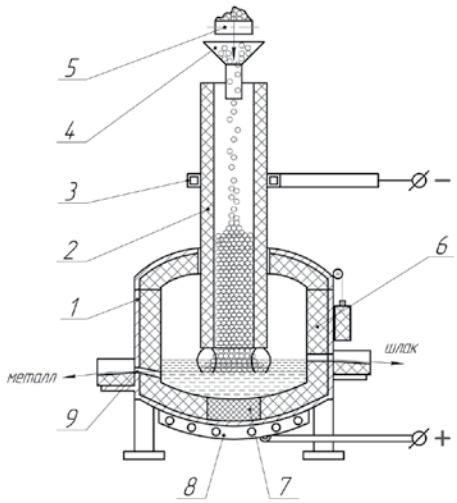


Рис. 1. Электродуговая печь постоянного тока с полым электродом:
1 — корпус печи, 2 — полый трубчатый электрод, 3 — держатель, 4 — загрузочная воронка, 5 — дозирующий питатель, 6 — летка шлаковая (окно), 7 — донный электрод, 8 — холодильник, 9 — летка чугунная

В корпус печи 1 при первоначальном запуске загружают некоторое количество коксика для исключения разгара нижнего электрода 7. Опусканием электрода 2 специальным механизмом (не показан) зажигается дуга и разогревается зона восстановления. При необходимости через шлаковое окно (летку) 6 подбрасывают и наводят жидкий шлак или жидкий металл из лома. После появления жидкого расплава (так называемого «болота») начинают подавать через полость электрода 2 подготовленную смесь руды/концентрата и восстановителя (шихту) через воронку 4 и дозирующий питатель 5. При попадании подготовленной шихты в зону высоких температур электрической дуги оксиды термическим способом восстанавливаются углеродом твердого восстановителя внутри полого электрода и, одновременно оплавляясь, металл, проходя через слой шлака, отстаивается на подине печи. При достижении уровня металла до уровня летки 9, металл начинает вытекать и разливается либо в чушки, либо гранулируется. Возможен вариант переработки чугуна в сталь в агрегате ковш-печь в жидком состоянии. Шлак также поддерживается на определенном уровне за счет слива избытка через окно-летку 6 с условием обеспечения горения дуги. Длительная работоспособность печи обеспечивается охлаждением нижнего электрода и подины охладителем 8.

Температура восстановления в зоне образования электрической дуги, куда целенаправленно подается загружаемая шихта, составляет от 2 000 до 5 000 °С и более. Как известно, при таких высоких температурах восстановление металлов из оксидов резко интенсифицируется. В металлургии в настоящее время для процесса восстановления используется существенно низкие температуры 700–1 300 °С как в доменных (шахтных), так и в других известных процессах, включая электрические рудно-термические. В частности, в рудно-термических печах, несмотря на применение электроэнергии, восстановительный процесс идет при температуре плавления шлака и расплава металла с большим количеством восстановителя, что является основной причиной низкой интенсивности процесса восстановления, и, следовательно, низкой эффективности использования электрической энергии. Более того, температура расплава в зоне восстановления значительно понижается локально по причине интенсивного расходования тепла на реакции восстановления.

Процесс восстановления в электрической дуге, практически в плазме, по этой причине имеет существенные преимущества перед всеми известным металлургическими способами получения металла путем углетермохимического восстановления. Такие же локальные понижения температуры в зоне восстановления в электрической дуге с 5000 °С до 2000–3000 °С не приводят к замедлению процесса восстановления как в руднотермических печах.

Экспериментальные работы ОАО «ВНИИМТ» по восстановлению различных типов сырья новым способом показали, что процесс восстановления любого сырья осуществляется высоко интенсивно. Из литературных данных известно, что при температурах более 1600 °С при восстановлении железа переход из сырья V, Cr, и Ti в металл значительно увеличивается, что способствует получению природно легированного металла.

Печь работает на шихте с подогревом (до 400 °С) в нижней части трубчатого электрода с подмешиванием угля в железорудное сырье (шламы, замасленная окалина, руда, концентрат и др.). Готовыми продуктами проплавки шихты с содержанием железа 65–70% являются: жидкий чугун массой 650–700 кг, шлак в пределах 100–150 кг на тонну чугуна в зависимости от содержания железа в исходном сырье и отходящие газы в пределах 200–250 кг с учетом углерода угля. Расчеты теплового баланса показывают, что новая технология прямого получения жидкого чугуна в процессе электродугового восстановления твердым восстановителем (углем) без использования дорогостоящего и дефицитного кокса, природного газа, нагретого воздуха, кислорода и флюсов позволяет получить жидкий чугун при удельных затратах тепла 1333 кВт·ч/т.

В то же время из литературных источников известно, что усредненный удельный расход тепла при металлизации руд в шахтных печах, включая доменную печь и печь «Мидрекс», составляет около 3035 кВт·ч/т, а степень использования тепла газов — от 27,4 до 47%. С учетом этих коэффициентов использования тепловой энергии реальная потребность в тепле в шахтных печах составит от 832 до 1426 кВт·ч/т, что вполне адекватно коррелируется с удельными затратами тепла по новой технологии ОАО «ВНИИМТ» электродугового восстановления и плавления. Если учесть, что продуктом шахтных и других типов металлизационных печей являются металлизованные окатыши, из которых еще необходимо получить расплавленный металл доменным или электродуговым способом на ДСП, а по технологии ОАО «ВНИИМТ» получается жидкий металл за одну стадию без операции окомкования концентрата, то преимущества нового способа прямого получения металла ВНИИМТ являются неоспоримыми.

Помимо указанного основного достоинства новой технологии ВНИИМТ можно отметить следующие достаточно существенные преимущества:

1. Технология позволяет перерабатывать железорудное сырье с содержанием железа в руде от 35% без специальных дополнительных операций, таких как окомкование, кроме измельчения до минус 5 мм и подсушки до 1–2% влажности. При этом выход чугуна составит около 350 кг, газов около 100–150 кг и шлака около 500–550 кг на тонну сырья.
2. Технология позволяет получать жидкий чугун из любого железорудного сырья, обогащенного или необогащенного, включая отходы (цветные шлаки).
3. Для запуска технологии необходимо помещение, электроэнергия, печь дуговая с устройством загрузки сыпучего материала, вода для охлаждения печи, уголь в объеме 15–20%, система отвода и очистки газов в объеме газов диссоциации при восстановлении оксидов железа (примерно

15–20%). Других энергоносителей (газ, воздух, кислород и т.п.), а также дополнительного оборудования не требуется.

4. Технология обладает высокой экологичностью (выбросы газов до 10 раз ниже, чем в доменном процессе), компактностью, мобильностью, низкой трудозатратностью. Сравним электродуговой процесс ОАО «ВНИИМТ» с доменным процессом. Известно, что доменная печь выделяет огромное количество доменного газа. В настоящее время для интенсификации доменного процесса и сокращения расхода кокса существует много различных мероприятий, влияющих и на свойства доменного газа: повышение давления, температуры и влажности доменного дутья, обогащение дутья кислородом, вдувание в горн природного газа, мазута и т.п. В результате совокупного действия этих факторов в составе доменного газа повышается содержание водорода с одновременным уменьшением CO, вследствие чего теплота сгорания его изменяется мало и составляет около 3500–4000 кДж/м^3, а выход доменного газа снижается с 3800–4000 до 2000–2500 м^3/т чугуна. Печь ВНИИМТ в процессе восстановительной плавки использует, в основном, тепло выделяемое электрической дугой, сторонних газов в рабочее пространство не подается. Поэтому при выплавке одной тонны чугуна по стехиометрическому соотношению количество выделяющихся газов от процесса составит 300–400 м^3/т чугуна.
5. Технология в тандеме с системой «ковш-печь» позволяет получать сталь непосредственно из жидкого чугуна путем непрерывной продувки кислородом с небольшой интенсивностью.
6. Технология может обеспечить высококачественным сырьем мини-металлургические заводы (взамен лома).
7. Технология ОАО «ВНИИМТ» позволяет получать многие ферросплавы. В лабораторных условиях опробованы процессы получения ферроникеля, феррохрома, ферромарганца, выплавки железа из красных шламов, из шлака режского никелевого завода.
8. При восстановлении окисленных никелевых руд (например, Серовского месторождения) возможно получать ферроникель с содержанием никеля до 25%. При плавке окисленных никелевых руд с содержанием никеля 1,5% и железа 5,5% получается сплав с соотношением никель/железо = 1,5/5,5 = 0,27, то есть 27% никеля. Выход сплава из сырой руды составит всего 70 кг на тонну руды, но благодаря высокой стоимости никеля (включая ферроникель ФН-25), затраты на электроэнергию (по предварительным расчетам) составят не более 30–40% от выручки.
9. Еще одним преимуществом технологии электродугового получения чугуна ОАО «ВНИИМТ» является возможность 100% использования содержащегося железа в добытой из земли руды. Известно, что сегодня доменные печи, как правило, работают на обогащенном и окомкованном сырье. При обогащении некоторых руд с хвостами теряется безвозвратно до 25% железа. Следовательно, до годного продукта доходит только около 75% добытого железа. При использовании новой технологии ОАО «ВНИИМТ» — электродугового получения чугуна из руды без предварительного обогащения — в дело идет все 100% железа, добытого из недр. Расчеты показывают, что даже при непроизводственных затратах электроэнергии на плавление балласта, добавочное увеличение выхода металла на 25% с лихвой перекрывает эти расходы. Из чего следует, что достаточно богатые руды выгоднее перерабатывать без обогащения по новой технологии ОАО «ВНИИМТ», так как обогащение с получением концентрата неминуемо приводит к потере металлов с хвостами до 25%.

А также следует еще раз отметить, что экологические преимущества новой технологии получения металлов электродуговым способом ОАО «ВНИИМТ» уже сегодня позволяют в 10 раз снизить выбросы CO_2 (парниковых газов) в атмосферу и решать вопросы более эффективного использования богатства недр земли.

Список литературы

1. Shparber L.Ya. Metallurgiya zheleza i chuguna [Iron and cast iron metallurgy]. Tula: ASSOD, 1996, 768 p.
2. Lyakishev N.P. Some problems of the modern steelmaking process. Stal' [Steel]. 1996, no. 9, pp. 1–6.
3. Zaynullin L.A., Epishin A.Yu., Artov D.A., Karelin V.G., Spirin N.A. High-temperature carbothermic reduction of sideritic ores in electric arc. Metallurg [Metallurgist]. 2016, no. 11, pp. 31–34.

Д.В. Мехряков, ОАО «ВНИИМТ»
С.В. Петров, А.И. Харыбин, АО «ОЭМК»

РЕКОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ № 2 АО «ОЭМК»

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА РЕКОНСТРУКЦИИ

Цех окомкования и металлизации (ЦОиМ) АО «Оскольский электрометаллургический комбинат» предназначен для обеспечения металлизованными железорудными окатышами и брикетами из мелочи электросталеплавильного производства комбината. Также продукция ЦОиМ отгружается сторонним потребителям, в том числе, и на экспорт. Спрос на железо прямого восстановления обусловлен высокой чистотой и стабильным составом для получения высокого качества выплавляемой стали.

В состав ЦОиМ входят:

— отделение окомкования для производства окисленных окатышей из магнетитового концентрата Лебединского ГОКа;
— отделение металлизации для восстановления окисленных окатышей в печах шахтного типа.

В отделении металлизации эксплуатируются четыре установки металлизации типа «Модуль 400» с начальной проектной производительностью 53 т/час. Процесс металлизации осуществляется по технологии «Мидрекс» — металлизация окисленных железорудных окатышей в шахтных печах путем их восстановления до металлического состояния восстановительным газом.

Ситуационный план отделения металлизации (УМ 1-4) представлен на рисунке 1.

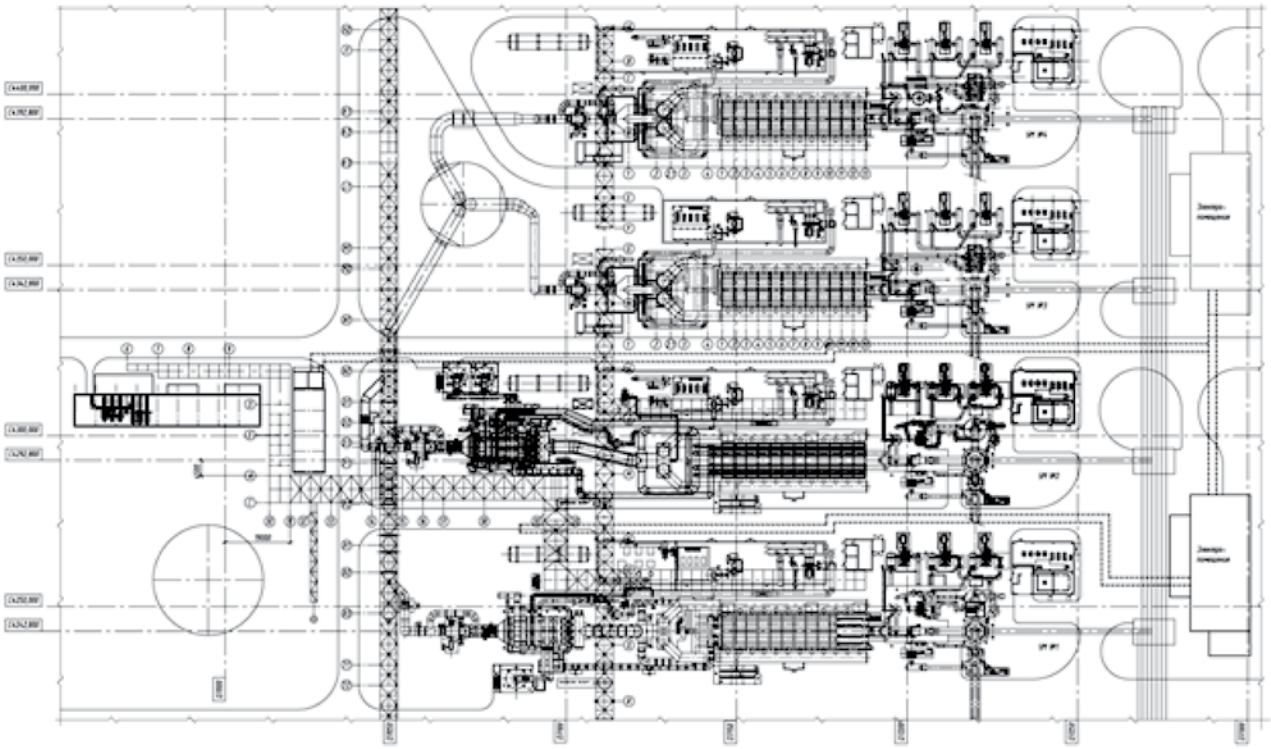


Рис. 1. Ситуационный план установок металлизации № 1–4

2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА

Технологии прямого восстановления железорудного сырья, в том числе окисленных окатышей, конвертированным природным газом получили широкое распространение среди мировых производственных гигантов.

Принятая на АО «ОЭМК» технология «Мидрекс» позволяет конвертировать природный газ, повторно используя в процессе отработанный (колошниковый) газ восстановительной печи. Это позволяет повысить эффективность использования восстановителей, содержащихся в отработанном газе и значительно снизить энергоемкость процесса.

Процесс обеспечивает автоматическое поддерживание оптимального соотношения, содержащихся в восстановительном газе водорода и окиси углерода, в полной мере используя тепло экзотермической реакции восстановления железорудного материала окисью углерода для компенсации потерь тепла на эндотермический процесс восстановления водородом. Это дополнительно повышает энергетическую эффективность процесса.

3. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЗОВАННЫХ ОКАТЫШЕЙ

Окисленные окатыши подаются конвейером в промежуточный бункер шахтной печи и через загрузочные трубы поступают в зону восстановления шахтной печи. В шахтной печи в противотоке окатышей и горячего восстановительного газа происходит восстановление железа. Баланс тепла для поддержания заданной температуры процесса обеспечивается соответствующим соотношением содержания в восстановительном газе окиси углерода и водорода.

Колошниковый газ из печи очищается от пыли и охлаждается водой в скруббере, после чего разделяется на два потока — топливный газ (для горелок реформера) и технологический (для приготовления восстановительного газа). Технологический газ проходит через компрессоры, каплеуловитель и сме-

шивается с природным газом. Подогретый в рекуператоре смешанный газ очищается от серы и подается к реакционным трубам реформера.

В реакционных трубах реформера на никелевом катализаторе протекают эндотермические химические реакции. Тепло для нагрева и конверсии выделяется в межтрубном пространстве реформера за счет сжигания смеси природного и топливного газов. Источником водяного пара и двуокиси углерода является технологический газ.

Подогретый в рекуператоре воздух подается воздуходувкой на горелки реформера. Восстановительный газ из реформера корректируется природным газом по метану и направляется в зону восстановления шахтной печи. Для увеличения температуры и объема восстановительного газа предусмотрена инжекция кислорода.

Дымовые газы реформера отводятся в дымовую трубу, предварительно нагревая в рекуператоре воздух для горелок, смешанный и природный газы. Часть дымовых газов используется для получения инертного газа, применяемого для газодинамического уплотнения затворов и питателей шахтной печи при штатных режимах.

Из зоны восстановления шахтной печи металлизованные окатыши поступают в промежуточную зону, где происходит дополнительное восстановление и науглероживание. Для регулирования массовой доли углерода в окатышах применен ввод природного газа в промежуточную зону печи. В зоне охлаждения температура окатышей снижается охлаждающим газом до температуры не выше 70 °С.

Отработанный охлаждающий газ очищается от пыли и охлаждается водой в скруббере. Затем охлаждающий газ через компрессор подается на смешение с технологическим газом, проходит через каплеуловитель и подается в нижнюю часть зоны охлаждения шахтной печи. Для предотвращения перетока горячего восстановительного газа в зону охлаждения к охлаждающему газу подается природный газ.

Выгрузка охлажденных металлизованных окатышей из печи осуществляется маятниковым разгрузочным устройством в нижней части печи. Годный продукт, выгружаемый из печи, подается к бункерам электросталеплавильного цеха или к бункерам для дальнейшей отгрузки сторонним потребителям.

Металлизованные окатыши пирофорны при температуре 150 °С. Для предотвращения спекания при температурах процесса выше 890 °С и понижения реакционной способности металлизованных окатышей применяется технология термического пассивирования, включающая нанесение защитного покрытия перед загрузкой окисленных окатышей в печь.

4. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РЕКОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ № 2

После многолетней эксплуатации произошло снижение производительности УМ2, что объяснялось низкой эффективностью катализаторов при повышенном сроке эксплуатации; неудовлетворительным состоянием основного оборудования — реакционных труб реформера, компрессоров технологического газа и др.

Лимитирующими факторами увеличения производительности печей послужили:

— отсутствие технической возможности подъема температуры восстановительного газа;

— работа на предельных режимах эксплуатации систем горения и дымоудаления реформера.

Для обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции и с целью повышения производительности приняли решение о проведении в период с 2015 по 2017 гг. технического перевооружения УМ2 с заменой реакционных труб реформера.

ОАО «ВНИИМТ» по контракту выполнил работы:

— разработка технологического задания (включая материальный и энергетический балансы);

— комплекс обследовательских работ;

— проведение комплексных расчетов пропускной способности инженерных и транспортных систем;

— разработка проектной документации, организация и прохождение экспертизы;

— разработка рабочей документации, конструкторской документации на нестандартизированное оборудование индивидуального изготовления;

— авторский надзор за реализацией технических решений.

Управление капитального строительства и ремонта (УКСиР) АО «ОЭМК» организовало и обеспечило работу подрядных организаций, выполняющих строительно-монтажные работы, а также провело необходимую комплектацию оборудования.

Согласно программе ЦОиМ комплекс реконструктивных мероприятий был разделен на следующие блоки:

— выполнение инжиниринговых услуг и проектных работ (октябрь 2015 г. — июль 2016г.);

— комплектация и заказ изготовления оборудования (3 кв. 2016 г. — 1 кв. 2017 г.);

— подготовка площадки и монтаж оборудования с окончанием работ (сентябрь 2017 г.).

Строительно-монтажные работы УМ2 выполнялись в два этапа. На первом этапе весной 2017 года выполнено строительство байпасного дымопровода, который позволил организовать освобождение необходимой зоны под строительство нового рекуператора, дымососа и блока сероочистки. При этом выполнены подготовительные работы по переносу существующих коммуникаций, попадающих в зону строительства, а также демонтажные работы зданий и сооружений (мастерская и помещение экспресс анализов).

При строительстве нового байпасного трубопровода использован существующий дымосос и выполнена новая врезка в дымопровод Ду3400 (общий ствол УМ 1–2).

Выполнение мероприятий первого этапа позволили осуществить строительно-монтажные работы нового рекуператора, дымососа и сероочистки с сохранением производительности УМ2 во время проведения работ.

На втором этапе строительства в период плановой остановки выполнены мероприятия технического перевооружения в соответствии с разработанной рабочей документацией. Продолжительность остановки составила 55 суток.

5. МЕРОПРИЯТИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ УСТАНОВКИ МЕТАЛЛИЗАЦИИ № 2

Мероприятия реконструкции обеспечили увеличение производительности УМ2 по металлизованным железорудным окатышам с 80 т/час до 110 т/час. Предусматривались следующие мероприятия:

— Модернизация шахтной печи. Поперечное сечение печи увеличено за счет замены существующей футеровки на тонкостенную. Для исключения завала фурмы нижнего пояса выполнены наклонными с организацией защитных «козырьков». Диаметр фурм в верхнем и нижнем поясах различные.

— Увеличение диаметра реакционных труб с применением нового типа катализатора REFORMEX для повышения производительности реформера; изменение конструкции свода и пода реформера; замена коллекторов смешанного газа и соответствующих трубных соединений; замена главных горелок на более мощные.

— Увеличение числа оборотов привода для повышения производительности компрессоров технологического газа.

— Замена существующего рекуператора на новый рекуператор с двухступенчатым подогревом воздуха для горения и двухступенчатым подогревом смешанного газа до конечной температуры; одноступенчатым подогревом природного газа до заданной температуры. Существующая система перепуска горячего воздуха, используемая для защиты связок труб на холостом ходу и при нештатных режимах, заменена системой подачи холодного воздуха.

— Установка новой системы подачи холодного воздуха с дополнительной воздуходувкой.

— Модернизация системы инжекции природного газа в промежуточную зону печи — подача горячего природного газа после нагрева в рекуператоре.

— Установка дымососа на линии дымовых газов после рекуператора.

— Установка системы сероочистки смешанного газа для работы на окатышах с высокой серой без снижения производительности. Для оперативного переключения между блоками сероочистки и обеспечения бесперебойной работы установки предусмотрена вторая цилиндрическая емкость с ZnO с трубопроводами и запорно-регулирующей арматурой.

— Модернизация скруббера охлаждающего газа, включая замену насадки, удлинение гидрозатвора с соответствующим углублением существующего приямка.

— Модернизация скруббера колошникового газа с выносом каплеуловителя топливной части и установки холодильника топливного газа.
— Модернизация скруббера обеспыливания ШП 2. Для очистки от пыли увеличенного объема воздуха системы аспирации проведена замена существующего скруббера обеспыливания.
— Модернизация РУ 0,4 кВ и 10 кВ системы оборотного водоснабжения.
— Модернизация системы анализа газа.
— Модернизация системы КИПиА.

Общий вид УМ2 после реконструкции представлен на рисунках 2 и 3.

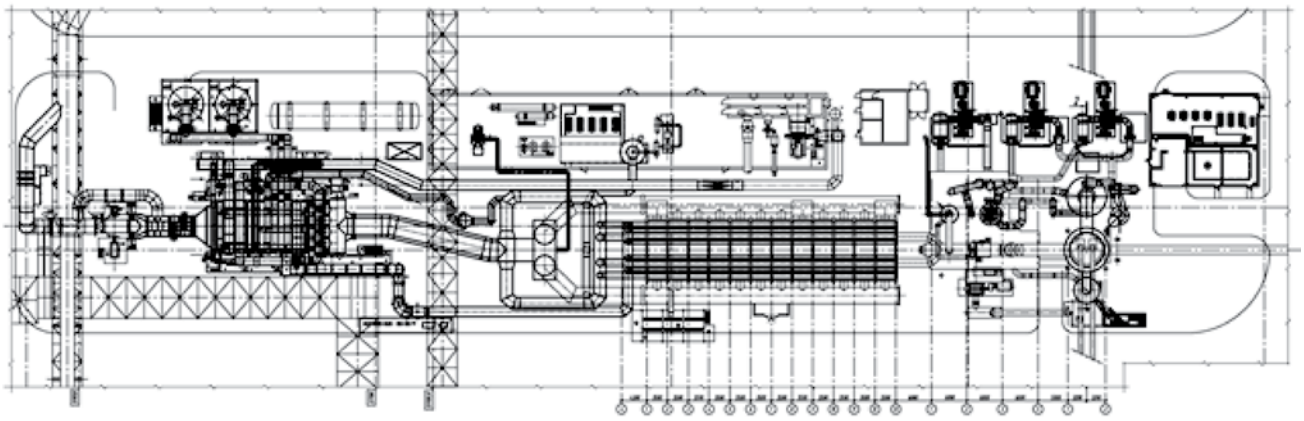


Рис. 2. План установки металлизации 2

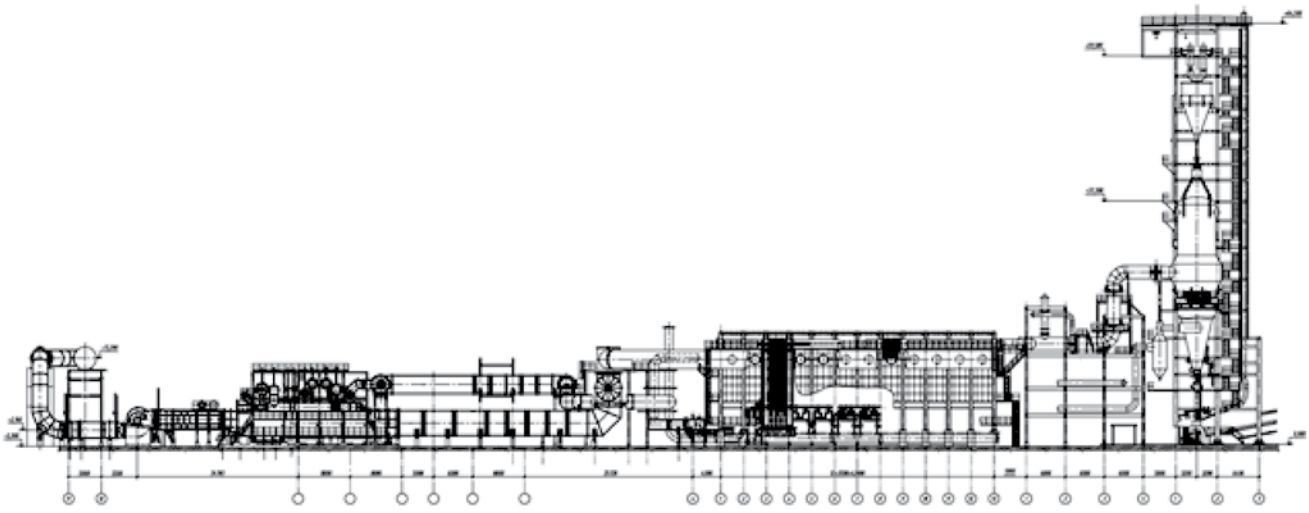


Рис. 3. Продольный разрез установки металлизации 2

6. ВЫВОДЫ

В результате выполненных мероприятий производительность установки металлизации 2 увеличена на 30 т/ч, удельный расход природного газа сократился на 5–7%. Обеспечена возможность работы УМ2 на окатышах с высокой серой без снижения производительности. Организация поэтапного выполнения СМР позволила осуществить строительство нового рекуператора, дымососа и сероочистки с сохранением производительности УМ2.

В августе 2018 года проведены плановые работы по ремонту и обслуживанию УМ2. Результаты осмотра нового оборудования подтвердили правильность выбранной концепции технического перевооружения.

Раздел IX
ТЕХНОЛОГИИ К ВНЕДРЕНИЮ

А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
В.Г. Макиенко, А.И. Истеев, ООО «Азовчерметавтоматика»
Р.В. Стрешнев, ООО «ВНИПИ САУ-2 0»
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА «ГАРАНТ ДП» КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ, РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ СТАБИЛИЗАЦИЮ И ОПТИМИЗАЦИЮ ТЭП, БЕЗОПАСНУЮ РАБОТУ ДП, ПРОДЛЕНИЕ КАМПАНИИ 358

Я.М. Гордон, НАТСН
Н.Н. Изюмский, Г.В. Матвеенко, ОПЧ
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
А.Л. Чайка, Е.Д. Вышинская, НАНУ «ИЧМ»
ПОДСИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ И ОПЕРАЦИОННЫХ ПРАВИЛ В КОКСО-АГЛО-ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 370

Э.М. Манашева, В.Г. Дружков, И.В. Макарова, И.Р. Манашев, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
УВЕЛИЧЕНИЕ СТОЙКОСТИ ЧУГУННЫХ ЛЕТОК КАК ФАКТОРА, СПОСОБСТВУЮЩЕГО ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА 376

М.Ю. Ширшов, В.Г. Дружков, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»
И. Е. Прохоров, ПАО «ММК»
ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРЯЧЕГО ДУТЬЯ ПО ФУРМАМ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ 381

А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
В.Г. Макиенко, А.И. Истеев, ООО «Азовчерметавтоматика»
Р.В. Стрешнев, ООО «ВНИПИ САУ-2 0»

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА «ГАРАНТ ДП» КОМПЛЕКСНОГО КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ, РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ СТАБИЛИЗАЦИЮ И ОПТИМИЗАЦИЮ ТЭП, БЕЗОПАСНУЮ РАБОТУ ДП, ПРОДЛЕНИЕ КАМПАНИИ

светлой памяти проф., д.т.н. Курунова И.Ф

«ГАРАНТ ДП» имеет восходящую иерархическую структуру, блок схема системы представлена на рисунке 1.

Базовой частью системы является АСУ ТП 1-го уровня, включающая типовые современные автоматические системы контроля и регулирования текущих параметров доменной плавки (ТАС ДП).

ТАС ДП охватывает все основные и вспомогательные объекты, входящие в комплекс доменной печи. Объединяет технические средства для измерения и представления технологической информации о ходе процесса и выполнения управляющих воздействий (исполнительными устройствами и приводами), реализуемые на программируемых логических контроллерах, системы отображения и хранения получаемой информации, информационные коммуникации.

АСУ ТП 2-го уровня включает следующие специальные локальные автоматизированные системы диагностики, контроля, регулирования и стабилизации основных параметров процесса доменной плавки, определяющих газодинамический и тепловой режим, обеспечивающих безопасную работу доменной печи:

- система машинного зрения (SMV-AZZHM) контроля распределения газового потока, температуры и температурных полей на поверхности засыпи шихты, работы загрузочных устройств, регулирования распределения материалов системой загрузки;
- система диагностики и управления состоянием футеровки шахты;
- система диагностики и регулирования теплового режима фурменных зон;
- система диагностики и регулирования температуры чугуна в металлоприёмнике доменной печи;
- система контроля температуры чугуна контактным способом в течение всего выпуска;
- система диагностики и управления состоянием футеровки металлоприёмника и лещади доменной печи.

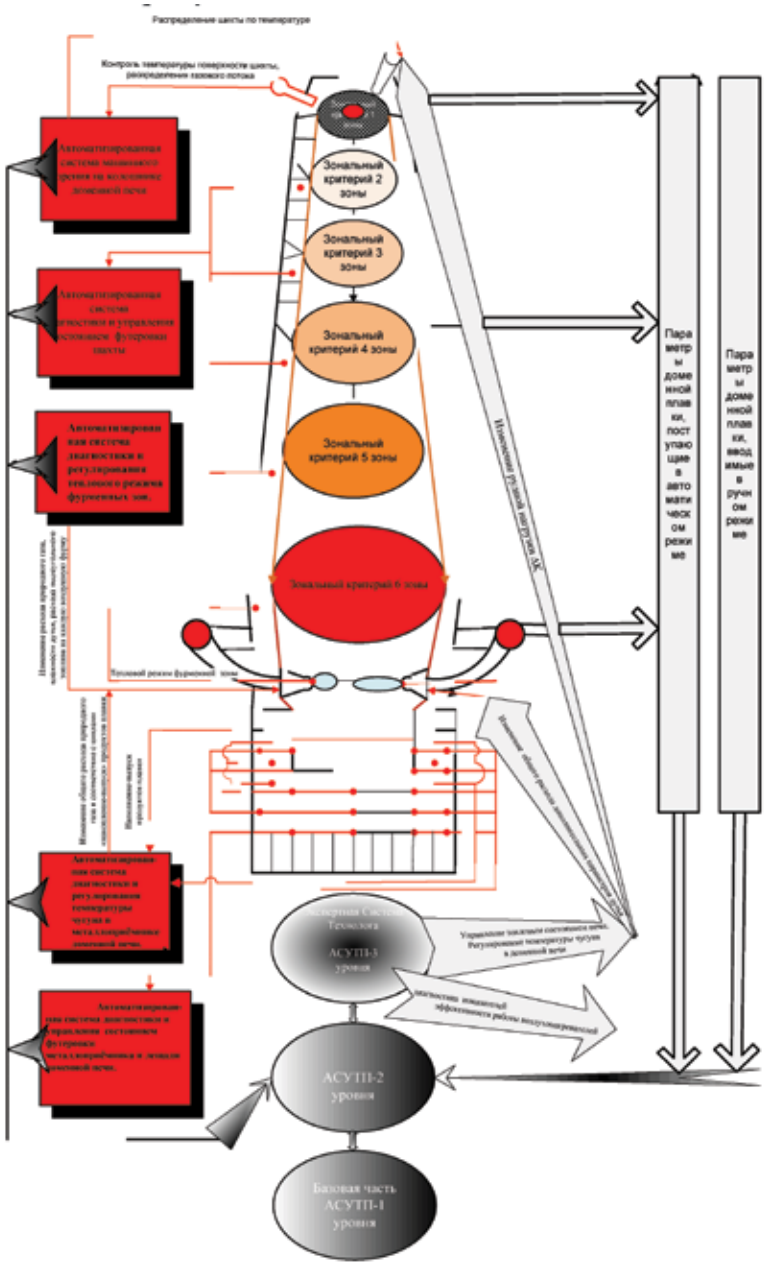


Рис. 1. Блок-схема системы «ГАРАНТ ДП»

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МАШИННОГО ЗРЕНИЯ (SMV-AZZHM) КОНТРОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА, ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ШИХТЫ, РАБОТЫ ЗАГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ.

Для эффективного управления процессом доменной плавки, включая систему загрузки и распределения шихты, необходим контроль распределения колошникового газа, температуры и температурных полей на поверхности засыпи в реальном масштабе времени.

Все известные в настоящее время радиальные колошниковые зонды, вводимые в доменную печь выше или ниже уровня засыпи, дают лишь ограниченное представление о распределении температур по одному или двум диаметрам (рисунок 2).

Имеют место случаи, когда показания зондов не соответствуют реальному распределению температур на поверхности засыпи (рисунок 3).

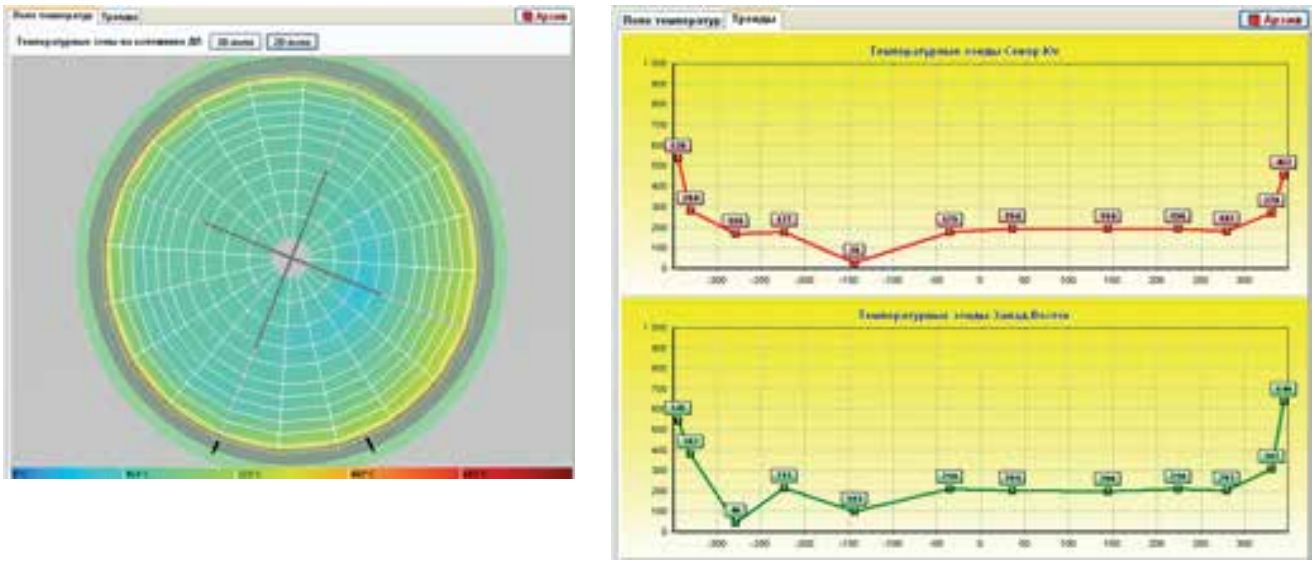


Рис. 2. ПАО «МК «Азовсталь» ДП-2. Расположение зондов и отображение температуры колошникового газа над уровнем засыпи в точках диаметрально расположенных зондов. Разработка ООО НПП «Азов-Черметавтоматика», 2005 г.

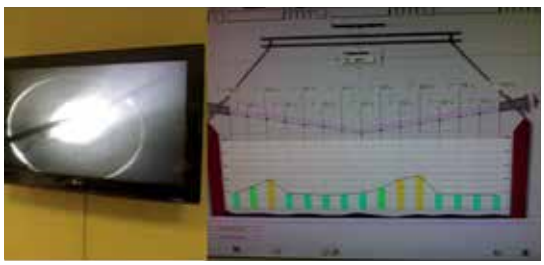


Рис. 3. ПАО «Енакиевский МЗ» ДП-3. Несоответствие показания зондов над уровнем засыпи, распределение газового потока и температур (Фирма «Сименс»). 2011 г. Слева приведен контроль распределение газового потока SMV-AZZHM в видимом спектре излучения

В системе SMV-AZZHM видеонаблюдение осуществляют двумя каналами с помощью чёрно-белой аналоговой видеокамеры типа WAT 902H и инфракрасного цифрового тепловизора A310 ФЛИР, установленных в одном корпусе. Тепловизор сертифицирован, метрологически аттестован. Он позволяет производить видеонаблюдение и измерение температуры в любой точке поверхности засыпи, а также отображать тепловые поля в реальной цветовой гамме (рисунки 4, 5)

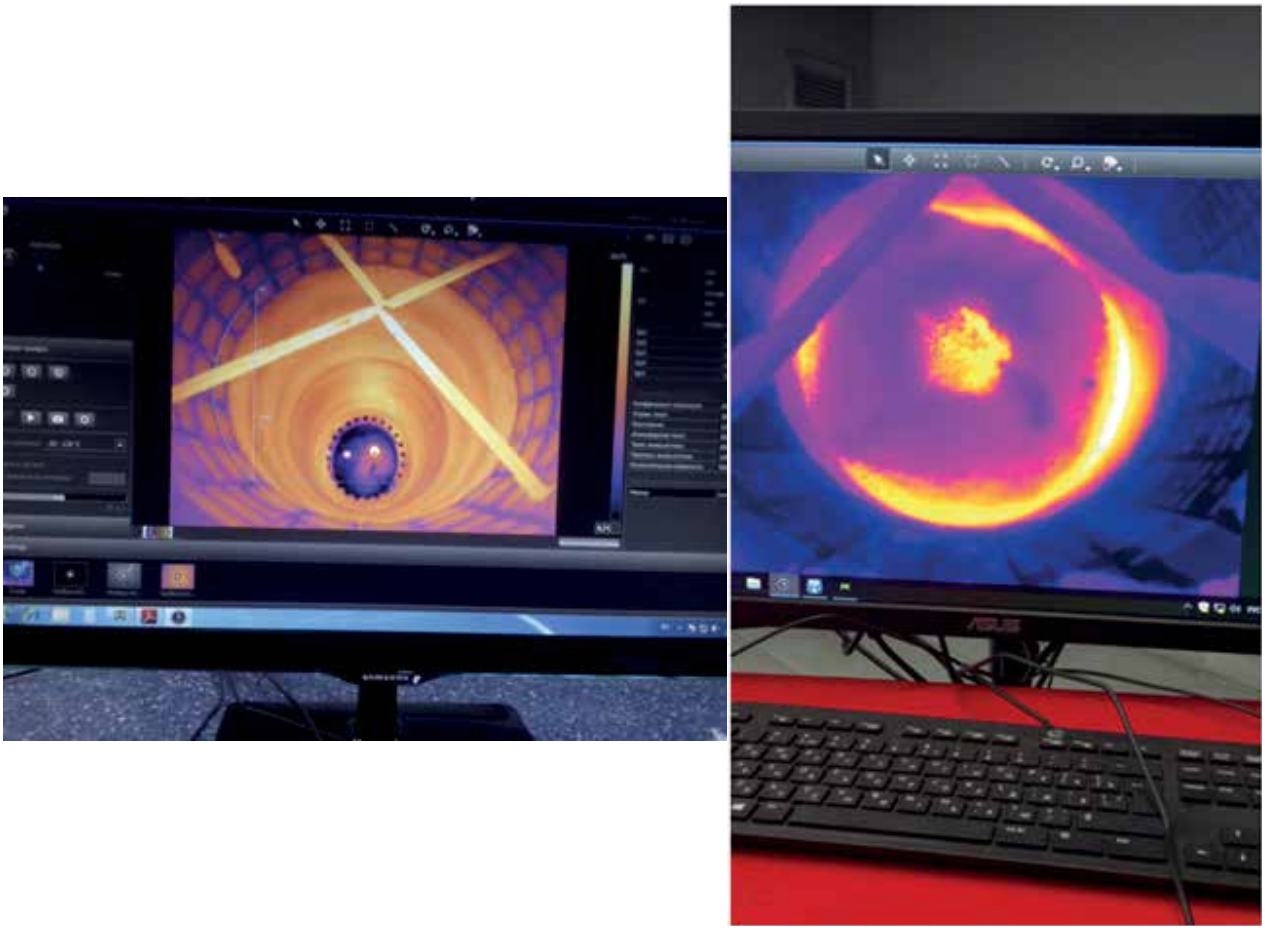


Рис. 4. ПАО «МК «Азовсталь» ДП-4. Видеоизображение инфракрасной видеокамеры от уровня зондов до уровня верхней лещади, перед загрузкой. Внизу видны фурменные приборы. Февраль 2016 г.

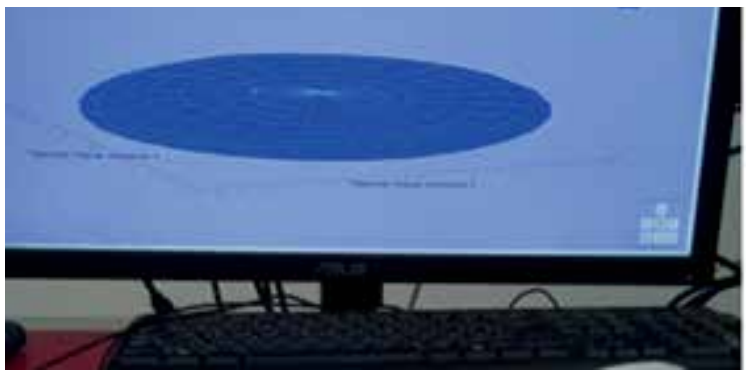


Рис. 5. ПАО «Запорожсталь» ДП-3. Несоответствие видеоизображения инфракрасной видеокамеры на поверхности засыпи (справа) температурному полю по показаниям зондов (слева). 2017 г.

Система SMV-AZZHM позволяет осуществлять визуальный контроль работы и целостности загрузочных устройств (рисунок 6).

Эффективность аналогичной системы была подтверждена голландской фирмой Ирбис [1].

Системы SMV-AZZHM установлены на АО «ЕВРАЗ НТМК» ДП-6, ПАО «Алчевском МК», ПАО «Енакиевский МЗ», ПАО «МК «Азовсталь», ПАО «Запорожсталь», ПАО «ММК им. Ильича».

Рис. 6. ПАО «Енакиевский МЗ» ДП-1. Визуальный контроль наличия и работы лотка. 2011 г. ПАО «Алчевский МК». ДП-1. Образование дыры в лотке. 2007 г.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ФУТЕРОВКИ ШАХТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Система осуществляет диагностику состояния футеровки шахты доменной печи с помощью специальных «Термоблоков», установленных в футеровку шахты по окружности на разных поясах (рисунок 7).

Расчёт остаточной толщины футеровки, образование гарнисажа, настылей производят решением обратной задачи теплопроводности дефференциального уравнения Фурье.

Исследование зависимости коэффициента теплопроводности от температуры для различных материалов футеровки шахты позволяет получить относительную ошибку конечного расчёта не более 4%.

Система позволяет рационально использовать полезный объём доменной печи за счёт исключения образования настылей, а управление гарнисажем позволяет защитить огнеупорную кладку от интенсивного износа и уменьшить тепловые потери с охлаждающей водой.

Систему устанавливают на доменных печах с любым видом футеровки шахты, произведенной методом торкретирования, огнеупорным кирпичом, бетонированием.

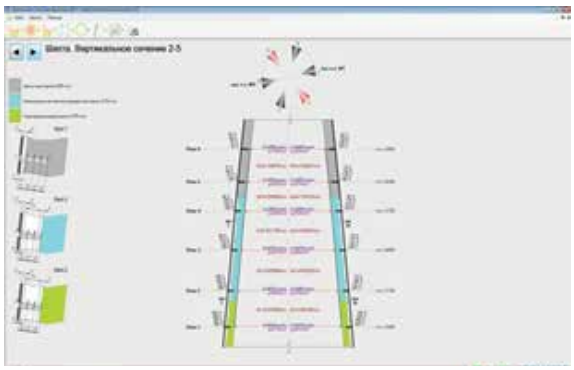


Рис. 7. ПАО «МК «Азовсталь» ДП-4. Установка тремоблоков по высоте и окружности футеровки шахты на примере 5-го пояса. 2016 г.

Системы установлены на ПАО «ДМЗ» ДП-2 (2003 г.), ПАО «ММК «Азовсталь»» ДП 2 (2005 г.), ПАО «ММК «Азовсталь» ДП-4 (2016 г.).

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ФУРМЕННОЙ ЗОНЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Разработан датчик контроля тепловых потоков для воздушных фурм доменной печи (рисунок 8) [2], устанавливаемый в носке. Датчик устанавливается в «носок» фурмы любой конструкции. Наличие установленного датчика в воздушную фурму, как показала практика (1972–2010 г.г.), не влияет на ее стойкость и позволяет:

- контролировать работу системы охлаждения на внутренней поверхности носка фурмы;
- определять неравномерность (деформацию) теплового режима фурменных зон по окружности горна доменной печи (рисунок 9);
- производить выравнивание теплового режима фурменных зон «вручную» или «автоматически», с помощью перераспределения углеводородсодержащих добавок к дутью: природный газ, мазут, пылеугольное топливо, дисперсная вода, пар.

Рис. 8. ПАО «ММК «Азовсталь» ДП-6. Установка датчика на воздушной фурме и его подключение на фурменной зоне доменной печи. 1991 г.

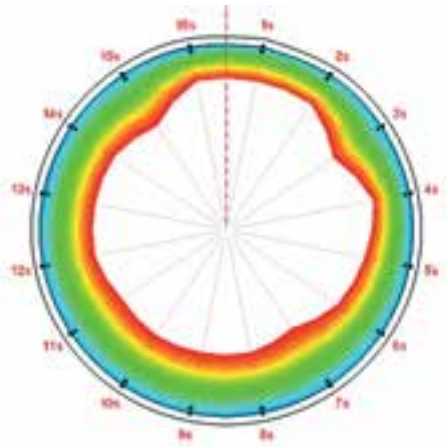


Рис. 9. ПАО «ММК «Азовсталь» ДП-6. Деформация теплового режима фурменных зон. 1991 г.

Выравнивание теплового режима фурменных зон по окружности горна на ДП-6 ПАО «ММК «Азовсталь» с помощью природного газа улучшило работу горновых газов. Степень использования СО увеличилась на 1,0%. Отмечено снижение удельного расхода кокса не менее, чем на 2% относительно базового значения, увеличение производительности доменной печи — не менее, чем на 1%.

Датчик позволяет регистрировать тепловые удары, в том числе критические (прогар), на поверхность фурмы, находящейся в доменной печи, в случаях контакта с жидкими продуктами плавки (рисунки 10, 11).

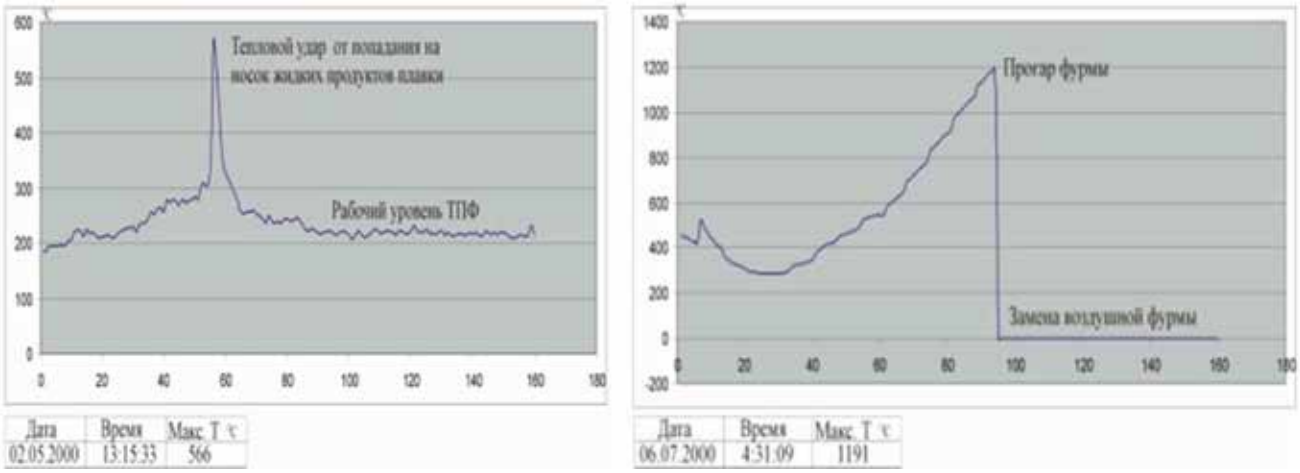


Рис. 10, 11. ПАО «ММК «Азовсталь» ДП-6. Регистрация тепловых ударов на фурмы. 1991 г.

Системы были установлены, на доменных печах ПАО «ММК «Азовсталь»», ПАО «ММК им. Ильича», ПАО «ДМЗ», АО «ЕВРАЗ НТМК».

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЧУГУНА В МЕТАЛЛОПРИЕМНИКЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Разработано и установлено на доменных печах Украины и России, Бразилии, специальное универсальное «Устройство» [3], позволяющее производить диагностику теплосодержания металлоприёмника доменной печи и одновременно контролировать циклы «накопление—выпуск» жидких продуктов плавки (рисунки 12–16).

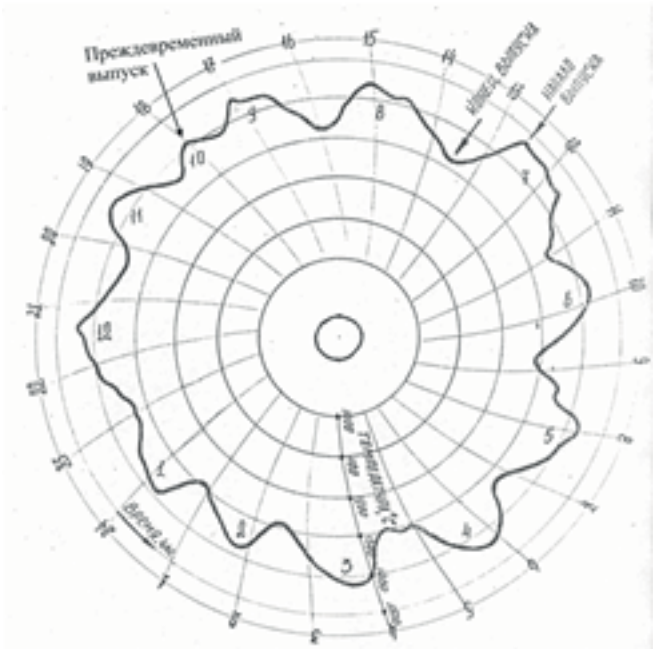


Рис. 12. ПАО «ММК им. Ильича» ДП-4. Регистрация «Устройством» циклов накопление-выпуск жидких продуктов плавки на самопишущем приборе «Диск». 1984 г.

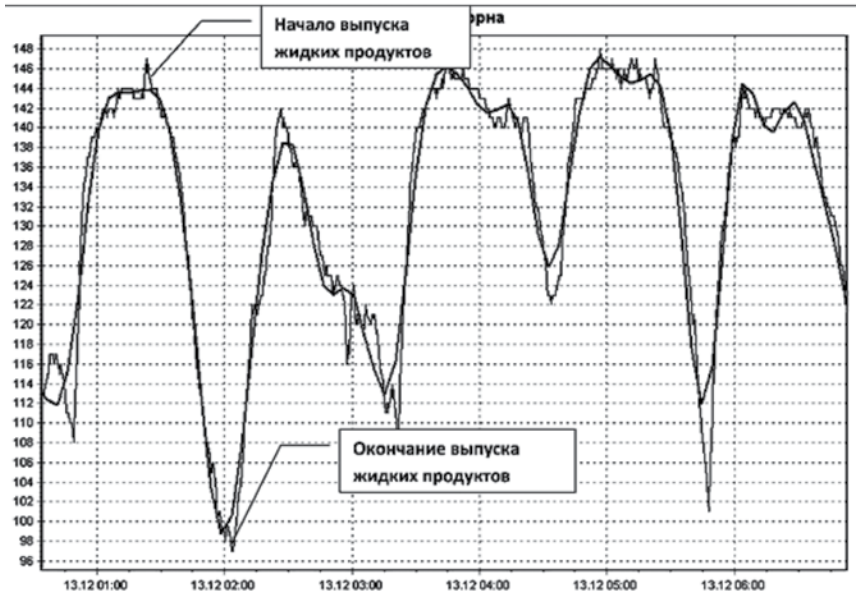


Рис. 13. ОАО «Тулачермет» ДП-3. Регистрация «Устройством» циклов накопление-выпуск жидких продуктов плавки на ЭВМ. 2004 г.

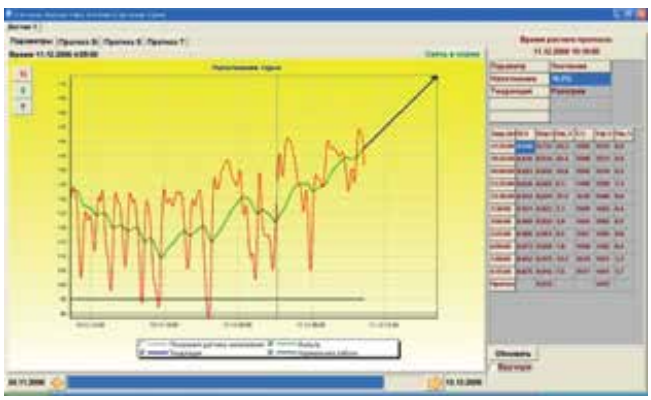


Рис. 14. ПАО «НЛМК». ДП-5. Разогрев металлоприемника . 2007 г.

Рис. 15. ПАО «НЛМК» ДП-5 «Норма» разогрева приёмника. 2007 г.

Рис. 16. ПАО «НЛМК» ДП-5. Похолодание металлоприемника. 2007 г.

Визуальный, а также автоматический контроль циклов «накопление-выпуск» для организации своевременного выпуска продуктов плавки позволяет определять степень накопления продуктов плавки в металлоприёмнике. Тренды теплосодержания металлоприёмника применяют в системе автоматического регулирования температуры чугуна.

Разработана на 8–10 часов вперед самонастраивающаяся модель прогноза теплосодержания металлоприёмника: «разогрев», «норма», «похолодание». Количественная оценка связи «Устройства» с параметрами, отражающими тепловой режим доменной печи, температуру чугуна, содержание кремния и серы в чугуне, производится автоматически с помощью универсального пакета фильтров с использованием разработанной методики выделения тренда показаний «Устройства».

Аппроксимацию показаний «Устройства» производят с помощью линейного адаптивного фильтра (нейронечёткого фильтра, нейросетевого фильтра). Критерием аппроксимации является по абсолютной величине максимальное значение коэффициента взаимно-корреляционной функции между показаниями «Устройства» и вышеназванными параметрами. Аппроксимация в виде адаптивной нейросетевой системы нечеткого вывода (Anfis) позволяет получить коэффициенты взаимной корреляции между показаниями «Устройства» и фактическими значениями [$T_{чуг.}$], [Si]% и [S]% , 0,9, 0,8 и 0,8 соответственно.

Автоматический контроль циклов «накопление-выпуск» позволяет осуществлять непрерывную автоматическую «кислородную» промывку горна.

С этой целью в режиме «накопление-выпуск» производят циклическое изменение общего расхода природного газа (или иных добавок к дутью). Применение данной технологии позволяет улучшить использование природного газа, пылеугольного топлива в процессе доменной плавки и снизить удельный расход кокса не менее чем на 2 кг/т чугуна относительно базового значения.

Системы установлены на доменных печах ПАО «ММК им. Ильича», ПАО «НЛМК», ПАО «Тулачермет».

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ФУТЕРОВКИ МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА И ЛЕЩАДИ

Стабильная и безопасная работа, а также продление срока кампании доменных печей, в значительной степени связаны с обеспечением их надежной автоматизированной системой диагностики состояния футеровки металлоприемника и лещади.

Прорывы чугуном футеровки металлоприемника и лещади являются одной из самых тяжелых аварий на доменной печи. Кроме возможных человеческих жертв неизбежны потери производства, большие затраты на восстановительные ремонты, перерасход кокса при задувке после ремонта.

В соответствии с Правилами безопасности в доменном производстве ПБ 11-80-94, (п.5.3.4.) и решением Госгортехнадзора России от 24.02.1997 г. вновь строящиеся и ремонтируемые на КР 1 разряда доменные печи «…должны быть оборудованы автоматизированными системами контроля разгара кладки».

Разработанная авторами в 1983 году концепция системы [4] подтвердила свою жизнеспособность и в настоящее время широко применяется в ближнем и дальнем зарубежье.

Безотказная работа системы рассчитана на всю кампанию доменной печи при отсутствии механических повреждений в период эксплуатации закладных устройств. На ПАО «НЛМК» ДП-6 установленная система проработала с 2001 по 2016 годы. На ПАО «Тулачермет» ДП-3 система работает с 2003 г. по настоящее время.

Исследование зависимости коэффициента теплопроводности от температуры для различных материалов футеровки металлоприёмника и лещади позволяет получить относительную ошибку конечного расчёта не более 2%.

Управление гарнисажем позволяет защитить огнеупорную кладку от интенсивного износа и продлить кампанию доменной печи.

Система включает в себя комплекс специальных газоплотных узлов (СГПУ) с термоэлектрическими преобразователями. СГПУ устанавливают вместо крепёжного целого болта или в полый болт холо-

дильников лещади [3]. Монтаж термопреобразователей по высоте и окружности футеровки производят внутри доменной печи (рисунок 17).

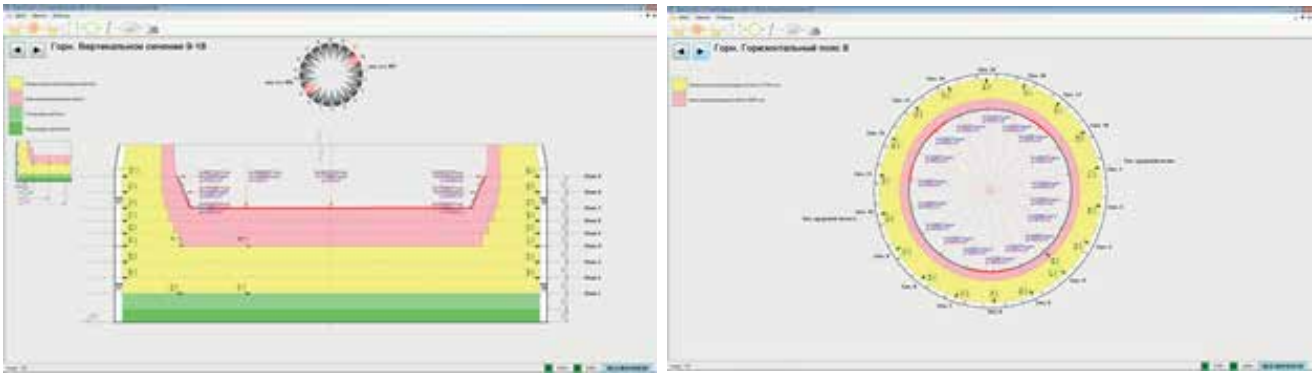


Рис. 17. ПАО «ММК «Азовсталь» ДП-4. Установка термопреобразователей по высоте и окружности футеровки металлоприёмника на примере 8-го пояса. 2016 г.

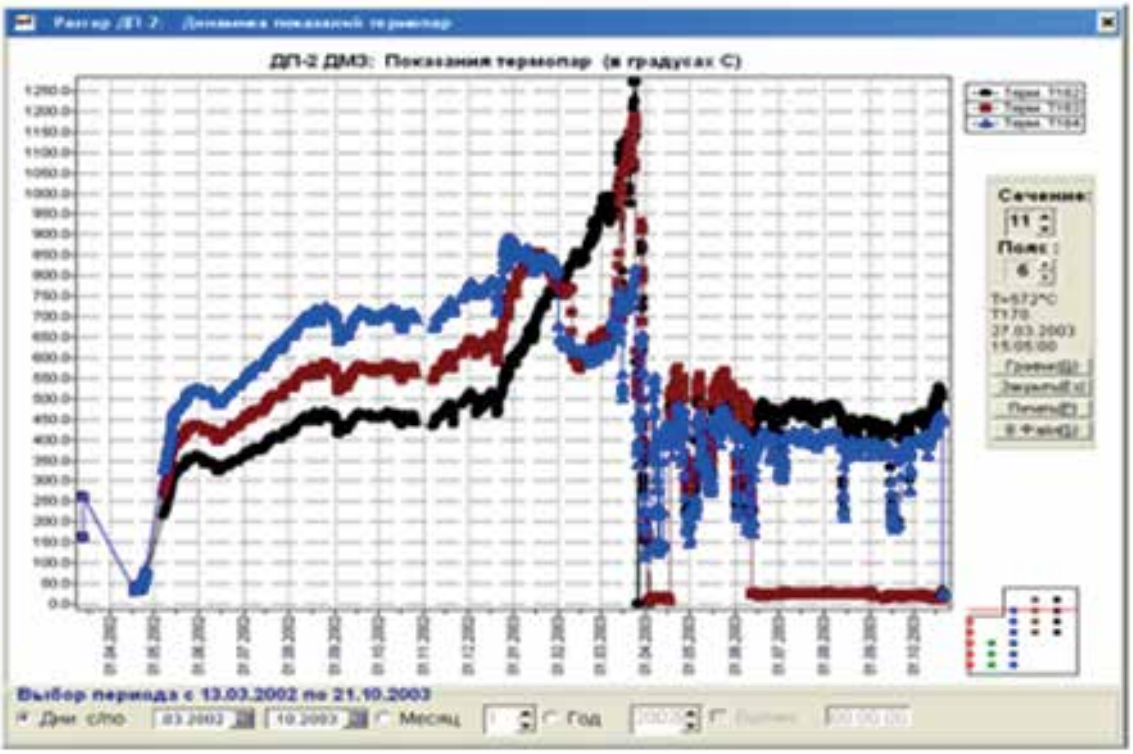


Рис. 18. ПАО «ДМЗ». ДП-2. Регистрация термопреобразователями появление горновых газов. 12.01.2003 г. Тренд чёрного цвета. Печь задута 15 мая 2002 года. Попадание воды из прогоревших холодильников шахты, привело к выгоранию углеродистого блока, с «холодной» части и прорыву горна 15 октября 2003 г.

Системы установлены на 8 ДП Украины, 8 ДП в России, 8 ДП в КНР.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГА

АСУ ТП 3-го уровня представляет автоматизированная Экспертная Система Технолога (ЭСТ), предназначенная для достижения номинальных технико-экономических показателей, обеспечения безопасной работы и продления кампании доменной печи [5].

Работает в режиме советчика мастера и в автоматическом режиме.

ЭСТ в реальном масштабе времени производит мониторинг и визуализацию востребованной текущей и архивированной информации, автоматическую предупреждающую и аварийную сигнализацию, в случаях выхода контролируемых параметров за пределы допустимого значения.

На основном мониторе ЭСТ (рисунок 19) производят систематизированную оценку показателей теплового и газодинамического режимов доменной печи, полученных непосредственной диагностикой специальных систем и расчётным путём по зональным критериям:

- прогнозные и реальные значения температуры чугуна;
- прогнозные и реальные значения содержания кремния и серы в чугуне;
- экономичность текущего процесса доменной плавки.

В ЭСТ входят:

- АСУ ТП 1-го уровня;
- АСУ ТП 2-го уровня;
- система автоматической диагностики показателей эффективности работы воздухонагревателей.

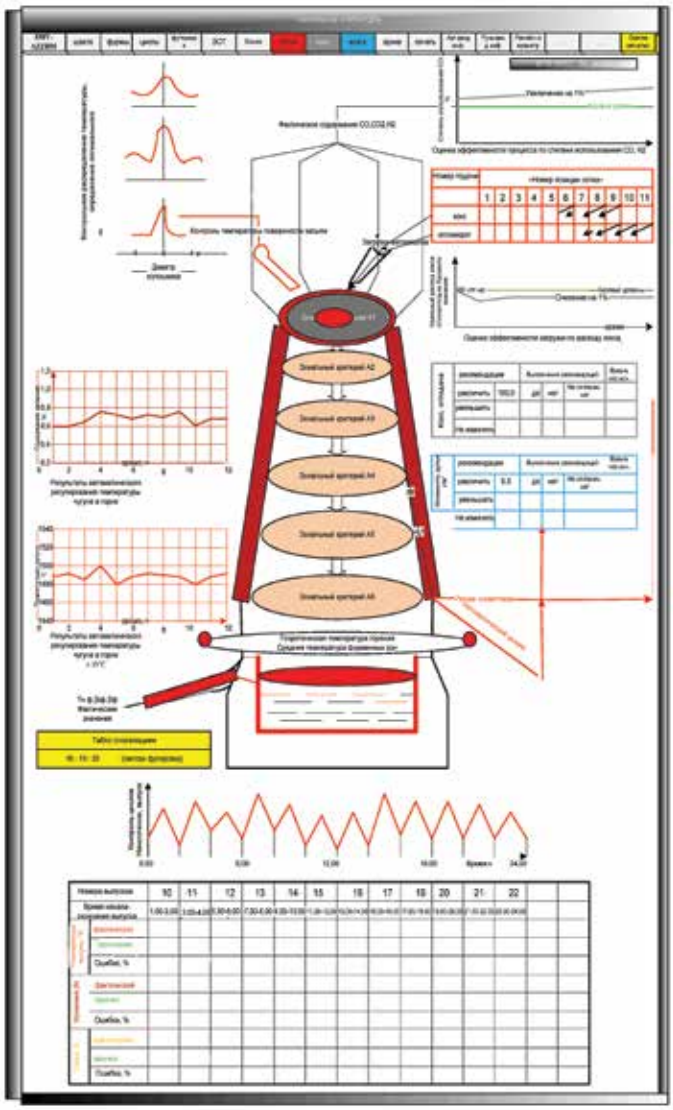


Рис. 19. Главный экран монитора ЭСТ системы ГАРАНТ ДП

Приведенные в статье материалы являются результатом работ, в которых принимали участие представители отраслевых институтов, предприятий, благодарность которым выражена на сайте головного разработчика azovchermetavtomatika.com.

Однако основой успеха системы ГАРАНТ ДП авторы считают научный фундамент, который был заложен профессором Куруновым И.Ф. в МИСиС (1972 г.)

Список литературы

1. П. Тонтелинг, Ж.Ж. Винсиотти, Н. Витор. Чёрные металлы, [Stahl und Eisen], 1982, №3, сс. 3–8.
2. Курунов И.Ф., Макиенко В.Г. и др. Авторское свидетельство № 842107, 1981, от 03.03, сс. 1–7.
3. Макиенко В.Г. и др. Авторское свидетельство № 1170784, 1985, от 01.04, сс. 1–10.
4. Курунов И.Ф., Макиенко В.Г. и др. Патент № 2044058, 1995, от 20.09, сс. 1–5.
5. Положительные результаты тендера, Исфаган, Иран, 2012 г.

Я.М. Гордон, НАТСН
Н.Н. Изюмский, Г.В. Матвеенко, ОПЧ
А.А. Третяк, ООО Фирма «ТАЛС-1»
А.Л. Чайка, Е.Д. Вышинская, НАНУ «ИЧМ»

ПОДСИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ И ОПЕРАЦИОННЫХ ПРАВИЛ В КОКСО-АГЛО-ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

ВВЕДЕНИЕ

Представленные научно-практические направления работ по содержанию верхних уровней управления, планирования и сквозной оптимизации себестоимости чугуна исходят из подтвержденных положений, а также собственного и мирового опыта их реализации в следующем:

1) Математические модели динамики в режимах имитации и прогноза развития процессов имеют погрешности, зависимые от состава и точности измерений, действий определенного числа возмущений или дополнительных факторов, в том числе по степени адекватности отражения явлений непрерывного и дискретного характера.
2) Современные методы исследования операций являются вторым фундаментальным научным инструментом для описания сущности функционирования комплекса, определения признаков отклонений и приемов их компенсации, набора операционных правил и ограничений для достижения целевых технико-экономических и финансовых показателей работы.

Доклад содержит краткое описание характеристик внедренных математических моделей и подсистем верхнего уровня автоматизации на доменных печах ДП-6 НЛМК, ДП 1–5 ЧерМК, ДП-3 АК «Тулачермет», ДП-6 МК «Азовсталь», ДП-1 АМК, ДП 2–5 МК «ЗСт» в разные периоды их кампаний.

В комплексных алгоритмах оптимизации себестоимости чугуна реализованы оба указанные выше направления, используется положитель-

ный опыт многих зарубежных фирм, собственный научный задел, а также профессиональные знания известных доменщиков, агломератчиков и коксохимиков. Содержание технологических инструкций и норм, действующих на металлургических предприятиях России и Украины, воплощено как в алгоритмах оперативной диагностики отклонений и выработки рекомендаций по операционным предупреждениям аномалий, так и в задачах промышленного управления, планирования и оптимизации.

Приводятся примеры видеоформ и технико-экономические результаты использования подсистем в доменных цехах и в службах технического развития некоторых металлургических предприятий.

МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ, ДИАГНОСТИКА И ПОДСИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ

С 60-х годов XX века в период строительства основных объектов черной металлургии коксо-агло-доменного передела на отечественных предприятиях и учреждениях были разработаны и внедрялись в производство операционные правила анализа параметров доменной плавки; классификации видов и признаков отклонений, технологические инструкции их устранения; научные положения и описание моделей процессов тепло-массо-обмена, восстановления, газораспределения и других явлений (работы Б.И. Китаева, его учеников и других авторов [1–11]). Так, в тот период на ДП-9 МК «Криворожсталь» были внедрены в информационном и программном обеспечении систем централизованного контроля (СЦК АСУ ТП) ряд простых методик расчета показателей технологии и зависимостей. Локальные системы оценки отклонений в процессах и циклограммы состояния механизмов тестировались перед задувкой и по ходу вывода ДП-9 на проектный режим работы [13]. Первый этап разработок и практических приложений более совершенных моделей имитации процессов доменной плавки в составе систем управления базировался не только на работах собственных институтов и профессиональных практиков, но и на базе использования опыта зарубежных стран с развитыми отраслями металлургической и приборостроительной промышленности.

В течение последующего периода (с 1977 г. по 1989 г.) на основании правительственных решений интенсивно развивались и тестировались математические модели технологических процессов, алгоритмы диагностики и прогноза, а также логические правила и методы оптимизации показателей работы других крупных доменных печей, таких как ДП-6 Новолипецкого МК (1978 г.), ДП-5 Череповецкого МК (1986 г.). Работы по указанным направлениям были развернуты в ИЧМ (г. Днепропетровск), УПИ, ВНИИМТ (г. Свердловск), ЛПИ (г. Ленинград), ЦПКБ «Союзпромавтоматика» (г. Москва), позднее переименованное во ВНИПИ САУ с филиалом ДФ НИПИ САУ (г. Днепропетровск). В этих организациях были созданы рабочие группы, отделы и лаборатории специалистов по аналитическим описаниям явлений доменного процесса, проектированию, автоматизации, прикладному программированию, исследованиям операций, а также по экспериментальным исследованиям на действующих доменных печах, на лабораторном оборудовании и в развернутых центрах испытаний сырья и топлив. В состав межведомственных и международных рабочих групп в этот период времени вошли специалисты из ряда европейских стран и Японии, а также руководящие сотрудники служб автоматизации и цехов доменных производств МК «Криворожсталь», Новолипецкого МК, Череповецкого МК. До 1991 года условие применения средств автоматизации исключительно отечественного производства для металлургических предприятий было обязательным. Исключением были системы и моделей THYBAS фирмы Thyssen Stahl AG (комплект из 2-х измерительных горизонтальных зондов на уровне 7-м ниже уровня засыпи, термовизионной системы «Спиротерм» и технических средств фирмы Siemens). Технические средства фирмы Siemens были поставлены на Череповецкий МК (ДП-5).

Первые версии программного обеспечения моделей динамики теплового состояния и диагностики ровности хода печи (на языке FORTRAN 77 — по разработкам ИЧМ) были успешно испытаны на ДП-6 НЛМК [12, 14, 15] и на ДП-5 ЧерМК [16].

До начала 90-х годов имело место значительное отставание характеристик отечественных промышленных средств измерений и вычислительной техники от технологических требований. Недостаточное количество или низкая точность измеряемых параметров при ограниченных объемах памяти, быстродействии и надежности компьютеров явились причинами отставания промышленных приложений от научного уровня развития математических моделей и операционных правил управления. Кроме того,

на возможности и время внедрения отрицательно повлиял развал СССР, смена собственников в условиях глубокого экономического кризиса и приватизации в периоде 1992–1996 годов. Кризис обусловил отток большого числа профессиональных специалистов и ученых за рубеж, а также распад многих Министерств, НИИ и организаций, имевших прямое отношение к области внедрения всех видов обеспечения технологических задач автоматизации доменного производства. По этой причине результаты значительного количества НИР многих НИИ и ВУЗов, имевших цель создать и внедрить математические модели, не выразились в их практической реализации в составе действующих АСУТП. Разработки заканчивалось на этапах опытной проверки в вычислительных центрах или рекомендаций заводам. Процесс «выживания» профессиональных коллективов сопровождался резким снижением финансирования, уходом авторитетных ученых, профессиональных проектантов и специалистов в области прикладного программирования.

В 1991 г. первый положительный пример быстрой реакции по переходу на акционерную форму собственности с привлечением зарубежных инвестиций для воплощения накопленного в бывшем СССР опыта и научного задела по технологическим задачам автоматизации показала АК «Тулачермет». На основании итогов первого тендера был заключен контракт с английской фирмой TCS на поставку 3-х уровневой комплексной системы автоматизации:

- инструментальный — измерительная часть и контроллеры;
- базовый — рабочие станции и SCADA-система;
- верхний технологический уровень — на базе мощного промышленного компьютера VAX американской фирмы DEC и сетевых средств взаимодействия TCS.

Фирма-поставщик уступила 50% стоимости инжиниринговых услуг, обеспечила обучение и повышение уровня квалификации участников проекта: сотрудников АК «Тулачермет»; сторонних организаций — ДФ НИПИ САУ, НПП «Промоборудование» (г. Днепропетровск) и «Softindustry» (г. Тула). По результатам второго тендера были закуплены для ДП-3:

1) промышленная система «Геомет-800» в составе 2-х термовизионных головок;
2) системы дистанционного управления работой измерителей;
3) оборудование защиты их от запылений и действия высоких температур.

Кооперация и результаты внедрения этих проектов позволили значительно снизить себестоимость передельного чугуна АК «Тулачермет», повысить его качество до стабильного уровня. Отработали технологию выплавки чугуна с содержанием [Si] до 0,5%, [S] — до 0,015%, [P] и [Mn] — до 0,05%.

Первоначально верхний уровень был внедрен на промышленном компьютере VAX американской фирмы DEC в операционной среде VAX/VMS (1993–96 г.г.). В качестве системы взаимодействия всех моделей и алгоритмов диагностики с базовой системой автоматизации, сбора и отображения информации выступал пакет программ Maxi-Vis IV фирмы TCS (в н. вр. Eurotherm). После пожара в помещении центрального пульта управления в 1996 году технические средства верхнего уровня VAX сгорели.

С 1998 года приступили к восстановлению верхнего уровня на новых аппаратных и программных средствах. Из SCADA систем был выбран пакет «Trace Mode 5» (фирма «AdAstra», Москва), в основном, из соображений стоимости. Пакет мог функционировать под Windows NT/95. Фирма «AdAstra» также поставила драйвер для связи с нижним уровнем. Связь верхнего уровня с нижним (Trace Mode) осуществлялся через интерфейс OPC. Все программное обеспечение верхнего уровня было реализовано на языке C++.

Новые подсистемы «Рельеф засыпи» и «Распределение потоков газа и тепла по сечению колошника» были введены в эксплуатацию к концу 2000 г. на базе показаний профилемера и системы «Геомет-800». С 2000 по 2004 г.г. с целью сквозной оптимизации себестоимости и показателей качества чугуна на ДП-3 ИЧМ «Промоборудование», Фирма «ТАЛС-1» использовали все подсистемы для совершенствования технологии производства чугуна и агломерата.

С 1996 г. инжиниринговая фирма «Промоборудование» полным составом была включена в состав Ассоциации производителей чугуна (ОПЧ) на основании решений совещания доменщиков предприятий Украины, Объединений «Металлургпром» и «Укркокс». В начале этого периода для участия в реализации крупных инвестиционных программ по модернизации доменных печей Череповецкого МК на базе ранее выполненных НИР, проектов, накопленного практического опыта и научного задела

были восстановлены договорные и научные связи Ассоциаций доменщиков России и Украины, ИЧМ, фирм «Hatch» (Канада), «Прогресс», «ТАЛС-1», ВНИПИ САУ (г. Москва) с ОАО «Северсталь». В итоге, в период 2001–2008 г.г. совместно со службами автоматизации ОАО «Северсталь» для ДП-1, ДП-2, ДП-4, ДП-5 была разработана и внедрена на базе средств фирмы Siemens третья версия технологических подсистем и алгоритмов верхнего уровня. Полный комплекс автоматизации и экспертная система на ДП-4 были поставлены фирмой «Siemens VAI». Действующие в доменном цехе Череповецкого МК подсистемы «Расчета программ загрузки и распределения шихты», «Шлаковый режим», «Фурменная зона» были параллельно интегрированы в комплексную АСУ ТП. Межведомственная рабочая группа в период капитальных ремонтов доменных печей цеха курировала в ЧерМК вопросы по содержаниям: ТЭО, проектирование, реконструкции, субподрядные разделы работ поставщиков, программы задувок и вывода доменных печей на проектные показатели работы. Инвестиционные проекты также охватывали вопросы по топливной и сырьевой базе доменного производства, испытаниям кокса, агломерата и окатышей, а также по взаимодействию АСУ ТП печей с частями корпоративной вычислительной сети предприятия. В отличие от многих работ этого направления на доменных печах ЧерМК, практически в системе до 2008 г., были успешно реализованы задачи по технологическому насыщению верхнего уровня АСУ ТП, эксплуатационной надежности и диагностике. Это способствовало:

- снижению удельных энергетических затрат при производстве чугуна;
- увеличению межремонтного периода;
- устойчивой работы доменных печей;
- предотвращению аварийных ситуаций;
- выявлению технологических расстройств на ранней стадии [16, 17].

Точный вклад автоматизации в конкретные экономические показатели при производстве чугуна определить трудно. Тем не менее, АСУ ТП доменной печи явились важным компонентом современной технологии, а их экономическая значимость может быть определена как долевое мероприятие в достижении общих показателей. Кроме того, мониторинг, контроль, управление и безопасность работы доменных печей немыслимы без современного верхнего уровня подсистем в составе развитой АСУТП. На ОАО «Северсталь» технологи и руководство доменного цеха и печей переложили массу рутинных, но в то же время ответственных задач контроля и управления, на программируемую автоматику. Многие положения технологических инструкций, содержащих эксплуатационные правила и логические выводы, блокировки, модели прогноза и оценок, системы предупреждений и подсказок, используются в программах АСУТП. Поэтому система автоматизации доменного цеха в ОАО «Северсталь» имела прямое отношение к достижению следующих показателей:

1. По продолжительности кампаний доменных печей фактические сроки их эксплуатации превзошли нормативные межремонтные сроки. На ДП-3 ДП-5 это превышение составило 10%, на ДП-1, ДП-2 — 30%. Аналогичные показатели имели место и по удельной выплавке чугуна за кампании, а на ДП-1 ,ДП-2 они превзошли лучшие мировые достижения.
2. За 5 лет до кризиса 2007 года расход сухого скипового кокса был снижен с 422 до 416 кг/т чугуна, содержание кремния с 0,55 до 0,5 при укладке 96% в пределах 0,3–0,6%.

Эти достижения доменщиков Череповецкого МК были отмечены Государственной премией Российской Федерации.

В Украине за последние годы лидирующее положение по приведенным технико-экономическим показателям работы доменных печей с вдуванием ПУТ и по темпам модернизации систем автоматизации занимает МК «Запорожсталь»

С 01.10.2011 г. в доменном цехе МК «Запорожсталь» природный газ был полностью замещен пылеугольным топливом.

С 01.10.2011 г. по 31.03.2012 г. уровень вдувания ПУТ по цеху был повышен с 119 кг/т до 142 кг/т чугуна, расход кокса снижен с 431 до 396 кг/т чугуна [18]. При этом существенно ужесточились условия работы футеровки и режим охлаждения доменных печей. Это обусловило необходимость ввода оперативной оценки тепловых нагрузок, скорости выработки и определение остаточной толщины огнеупоров на всех участках профиля печи. В направлении стратегии комбината по модернизации систем контроля и автоматизации принято решение о переносе собственного и зарубежного опыта технологии

доменной плавки, также было принято направление переноса собственного и передового зарубежного технологического опыта на более высокий уровень развития измерительных средств, математических моделей, алгоритмов диагностики и IT-технологий. Новизна и практическая важность реализованных инженерных решений заключается в методиках и подсистемах:

- комплексной непрерывной оценки локальных удельных тепловых нагрузок на многослойные стены и холодильники шахты, распара, заплечиков и металлоприемника;
- расчета потребности кокса на покрытие абсолютного уровня общих и удельных тепловых потерь;
- экспертной оценки величины отклонений норм расхода кокса, обусловленных заменой или наращиванием или выработкой толщины огнеупорной футеровки (диапазон приращений расхода кокса находится в пределах (10–40) кг/т чугуна).

Новые инженерные решения и подсистемы позволили расширить технологическое содержание и число функций верхнего уровня. За период 2015–2018 г.г. содержание моделей, алгоритмов диагностики и выдачи рекомендаций верхнего уровня корректировалось в зависимости от вариантов всего комплекса АСУ ТП.

Ниже приведен полный список апробированных подсистем:

- Шлаковый режим.
- Состояние и разгар металлоприемника.
- Состояние фурменных очагов.
- Диагностика скорости схода шихты.
- Наполнение горна-выпуска.
- Себестоимость чугуна.
- Степень форсировки хода доменной печи.
- Модель распределения шихты по высоте и радиусу.
- Модель расчета рудных нагрузок (3 версии в зависимости от состава измерительных средств).
- Материальный и тепловой баланс доменной плавки.
- Минимальный кокс и процесс восстановления.
- Модель комплексного контроля состояния футеровки шахты, распара и заплечиков.
- Модель движения и характеристик состояния шихтовых материалов по высоте печи.
- Рельеф засыпи.
- Распределение кремния и серы в чугун и шлак.
- Распределение потоков газа и тепла по сечению колошника.
- Положение вязко-пластичной зоны.

Технологическая диагностика согласно ТИ по разделам:

- Ход печи.
- Сход шихты.
- Состояние горна.
- Состояние шлака.
- Радиальный ход.
- Окружной ход.
- Газопроницаемость.

Выработка рекомендаций по коррекции:

- Массы по видам: доз ЖР материалов и флюсов, расхода топлива.
- Программы распределения шихты по угловым положениям лотка БЗУ.
- Давления под колошником печи.
- Графика выпусков.
- Интенсивности хода по атмосферному дутью и технологическому кислороду.
- Состояния фурменных зон по окружности.

Технологические критерии эффективности работы верхнего уровня:

- Работа на сниженных расходах топлива.
- Ведение устойчивого производства чугуна.
- Стабилизация качества чугуна.
- Предупреждение нарушений норм безопасности технологии производства чугуна.
- Предупреждение прорывов горна и других аварий с потерей производства.
- Удлинение кампании печи.
- Обеспечение исходных данных для сквозной минимизации себестоимости чугуна.

Список литературы

1. B.I. Kitaev, et.al. Heats exchange in shaft furnace. «Metallurgy», Moscow, 1966, (Translated from Russian by Page, M. Simons) ed by P.Yong, Pergamon Press, Oxford 1967.
2. V.E. Vasilyev , et al. Performing Blast Furnace Smelting Using Durable Stable Slags. ONTI, NKTP, Scientific-Technical Publishers of Ukraine, 1935.
3. V.E. Vasilyev. Blast Furnace Smelting with Stable Slags. Scientific-Technical Publishers of Ukraine, Kiev, 1956, 259 p.
4. O.A. Yesin, O.A., P.V. Geld. Physical Chemistry of the Pyrometallurgical Processes, Part 1, Metallurgizdat Publishers, 1950; Part II, Metallurgizdat Publishers, 1954.
5. M.Ya. Ostroukhov. Process of Slag Forming in the Blast Furnace. State Publishers of Scientific-Technical Literature for Ferrous and Non-Ferrous Metallurgy, Moscow, 1963.
6. V.G. Voskoboinikov, N.G. Dunayev, et al. Properties of Liquid Blast Furnace Slags. «Metallurgy» Publishers, Moscow, 1973.
7. A.D. Готлиб. Доменный процесс, М.: Металлургия,1966. — 503 с.
8. А.Н. Рамм. Определение технических показателей доменной плавки. Ленинград, Изд. ЛПИ, 1971.
9. Ж. Мишар, Тепловые балансы и теплообмен в доменных печах. Перевод: Москва, Металлургиздат, 1963, 151 с.
10. Ya. Gordon. Gasdynamics of the shaft metallurgical furnaces with tuyere wind entry. Ph.D. thesis, Ural Politechical Institute, Sverdlovsk, Russia, 1974.
11. В.И. Мойкин. Разработка и использование математической модели для анализа процессов тепло-массообмена в доменной печи. Автореф. канд. дис., ВНИИМТ, Свердловск, Россия, 1976.
12. Б.И. Мирошниченко, Н.Н. Изюмский и др. Модель динамики теплового состояния доменной печи, В книге: «Проблемы автоматизированного управления доменным производством», Киев, Изд. Киевского института автоматики, 1977.
13. Ф.Н. Москалина и др. Освоение доменной печи объемом 5000м^3. Сборник научных трудов МЧМ СССР (ИЧМ), М., Металлургия, 1982, с. 5–14.
14. Э.А. Шепетовский, Н.Н. Изюмский, Е.Д. Вышинская. Эксплуатация локальных систем в комплексе АСУ доменной печи №6, Бюл. НТИ «Черная металлургия», М., 1988, № 6, с. 37–48.
15. Э.А. Шепетовский, А.М. Гавриков, Н.Н. Изюмский, Е.Д. Вышинская. Диагностика ровности хода доменной печи, Сборник «Технология выплавки чугуна», М., «Металлургия»,1989, с. 56–59.
16. А.П. Васильев, В.Н. Логинов, Н.Н Изюмский и др. Автоматизированная система управления комплексом доменного производства ОАО «Северсталь», Труды VII Международного Конгресса доменщиков, Москва–Череповец, 09–12 сентября 2002, с. 37–57, изд. «Полиграфист», 2003 г.
17. M. Geerdes, H. Toxopeus and C. van der Vliet. Modern Blast Furnace Ironmaking an introduction, IOS Press BV, Armsterdam (2009, Second Edition).
18. A.L. Chaika, S.V. Goman, S.V. Naboka a.o. Influence of lining and cooling system of blast furnace stack on coke rate and campaign of blast furnace // Chernie matalli (Ferrous metals), 2017, № 1, pp. 25–34.
19. V. Lebid. Современные решения технологии загрузки, выбора параметров загрузочного устройства и средств контроля на ДП №3 ПАО «Запорожсталь» с учетом применения ПУТ. 25th International Conference of the chief experts of blast furnaces of Ukraine — Zaporizhzhia, Oct. 2016.

Э.М. Манашева, В.Г. Дружков, И.В. Макарова, И.Р. Манашев,
ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова»

УВЕЛИЧЕНИЕ СТОЙКОСТИ ЧУГУННЫХ ЛЕТОК КАК ФАКТОРА, СПОСОБСТВУЮЩЕГО ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА

Известно, что сера является вредной примесью в чугуне, так как оказывает существенное влияние на качество стали. Из-за постоянно увеличивающихся требований к качеству производимой стали проблема десульфурации чугуна не теряет своей актуальности. Очевидно и то, что обессеривание в непрерывном режиме, реализуемое в доменной печи, эффективнее всего.

Факторы, способствующие десульфурации, можно разделить на традиционные и нетрадиционные. К традиционным факторам десульфурации можно отнести поддержание работы печи в режиме ровного хода, стабилизация теплового состояния горна и шлакового режима, снижение окислительного потенциала фурменных очагов, снижение поступления серы в печь с шихтовыми материалами (если это возможно). Эти факторы хорошо изучены и широко описаны в литературе. Дополнительными или нетрадиционными путями снижения содержания серы в чугуне (т.е. путями способствующими увеличению доли вторичной десульфурации) являются организация рационального режима выпусков, увеличение стойкости канала чугунных леток.

Организация режима выпуска жидких продуктов плавки в мире идет по двум основным направлениям:

— увеличение количества выпусков;
— увеличение продолжительности выпуска.

Каждое из направлений преследует следующие цели:

— поддерживать в горне доменной печи сухую часть коксовой насадки рациональной высоты, которая будет обеспечивать максимально полное восстановление вторичного FeO, образовавшегося при прохождении чугуна через фурменные очаги, при подходе к поверхности раздела газ—шлак в горне доменной печи;

— организовывать выпуск так, чтобы как можно большее количество чугуна во время выпуска обрабатывалось шлаком, т.е. снизить количество чугуна, накапливающегося в печи перед очередным выпуском.

Изменения режима накопления и опорожнения горна чугуном и шлаком такие, как увеличение числа выпусков при постоянной массовой скорости выпуска q_0 или увеличение продолжительности выпуска за счет ее снижения, неизбежно приведут к негативным внешним последствиям: изменению стойкости каналов чугунных леток и желобов.

Поэтому стойкость канала чугунной летки и сохранность его во время выпуска будут благотворно сказываться на процессах вторичной десульфурации. Кроме того, увеличение стойкости канала чугунной летки является актуальным вопросом еще и с точки зрения улучшения условий и безопасности работы персонала, а также увеличения срока эксплуатации печи.

В свою очередь, стойкость канала чугунной летки во многом зависит от применяемых леточных масс. Леточная масса представляет собой смесь компонентов, предназначенных для закрытия канала чугунной летки.

Новейшим этапом развития леточных масс становится дополнительное введение в их состав нитрида кремния.

Ряд исследований влияния нитрида кремния на свойства масс показывают, что введение его в состав масс улучшает коррозионную стойкость, повышает шлакоустойчивость и износостойкость. Однако до сих пор нет четкого представления о механизме влияния нитрида кремния на свойства леточных масс. Работ, посвященных данной проблеме, немного.

Для выявления механизма влияния нитрида кремния на свойства массы сотрудниками ООО НТПФ «Эталон» (г. Магнитогорск) совместно с работниками и аспирантами кафедры МЧМ МГТУ им. Г.И. Носова было решено провести ряд экспериментов, которые продолжаются по настоящее время.

Для проведения экспериментов были выбраны шесть составов леточных масс, в которых изменяли концентрацию нитрида кремния (вводимого в виде комплексной добавки NITROFESILTL, производимой ООО НТПФ «Эталон») от 0 до 15%. Увеличение или уменьшение содержания нитрофесила производили за счет изменения содержания других компонентов: коксика, шамота, шунгита и карбида кремния, а содержание связующих оставалось неизменным.

Таблица 1. Масса леточная безводная экспериментальная (на основе массы МЛБ-6М ПАО «ММК»)

№ п/п	NITRO-FESIL® TL	Смола К/У	Пек	УСК	Карбид кремния	Глина	Шунгит	Коксик	Шамот
1	0	25,7	5,8	9,2	7,0	21,1	7,7	14,5	9,0
2	3,2	25,7	5,8	8,8	6,3	21,1	7,3	14,1	7,7
3	**6,5**	**25,7**	**5,8**	**8,1**	**5,7**	**21,1**	**6,6**	**13,5**	**7,0**
4	10,0	25,7	5,8	7,4	5,0	21,1	5,9	12,8	6,3
5	12,5	25,7	5,8	6,9	4,5	21,1	5,4	12,3	5,8
6	15,0	25,7	5,8	6,4	4,0	21,1	4,9	11,8	5,3

Состав № 3 являлся реально применяемым в доменном цехе ПАО «ММК».

Леточные массы выбранных составов готовили следующим образом: в металлической емкости смешивали сухие компоненты, добавляли подогретую каменноугольную смолу, доводя до однородной консистенции. Формование образцов осуществляли на лабораторном прессе с усилием 200 кгс/см^2 в лаборатории РИОМ ООО «Огнеупор».

Поскольку по данным различных исследователей температура по длине канала чугунной летки не является величиной постоянной, а изменяется от 600 до 1450°С, то для проведения лабораторных спеканий были выбраны следующие температуры: 800°С, 1000°С, 1200°С (соответствует температуре в канале летки во время накопления жидких продуктов плавки) и 1450°С (соответствует средней тем-

пературе продуктов плавки во время выпуска). Спекания проводятся в коксовой засыпке в графитовых тиглях или шамотных огнеупорных ванночках. Коксовая засыпка с размерами частиц 1–2 мм позволяет имитировать восстановительную атмосферу в горне доменной печи и канале чугунной летки.

Спекания компонентов при температуре 1450°С проводятся в печи Таммана в лаборатории на базе ФГБОУ ВПО МГТУ им. Г.И. Носова, при температурах 800–1200°С — в муфельных печах на базе ООО НТПФ «Эталон» и ООО РИОМ «Огнеупор».

Время выдержки при указанных температурах было выбрано, исходя из режима графика выпусков, то есть фактического времени нахождения массы в канале чугунной летки, для чего задались продолжительностью цикла выпусков Т. Продолжительность цикла Т, в свою очередь, складывается из времени выпуска $\tau_в$ и интервала времени между выпусками $\Delta\tau$.

На доменных печах ПАО «ММК» количество выпусков в сутки равняется 15, тогда продолжительность цикла Т = 1440/15 = 96 мин. Продолжительность выпуска на доменных печах ОАО «ММК» составляет 50 минут, тогда интервал между выпусками $\Delta\tau = Т — \tau_в$ = 46 минут. $\Delta\tau$ соответствует времени пребывания массы в канале чугунной летки.

Так при наличии двух чугунных леток и периодическом выпуске (поочередно на каждую летку) время пребывания массы в канале летки составляет 46–50 минут. При проведении двух выпусков подряд на одну чугунную летку, нахождение массы в канале другой летки составляет 192 минуты или 3 часа 12 минут. Поэтому для спекания образцов применили два временных интервала 1 и 3 часа. Время нагрева до температуры выдержки составляет 2 часа. Охлаждение образцов происходит вместе с печью.

Также в сентябре 2013 года во время капитального ремонта I разряда доменной печи № 6 ПАО «ММК» из канала летки был отобран образец леточной массы.

После извлечения образцов из печи визуально оценивались изменения геометрических размеров и формы образцов. Вид их до и после спекания представлен на рисунке 1. На поверхности образца после спекания видны частицы приварившегося измельченного кокса.

Рис. 1. Внешний вид опытных образцов леточной массы: слева — до спекания; справа— после спекания

Оценка изменения химического состава образцов осуществлялась в лаборатории ООО НТПФ «Эталон» на спектрометре ARLADVNT'X и анализаторах LECOTCH600 и CS230. Результаты опытов представлены в таблицах 2–5.

На сегодняшний день проведен количественный рентгенофазовый анализ спеченного образца состава № 6 (с содержанием 15% NITRO-FESIL), результаты которого представлены в таблице 6.

Таблица 2. Изменение химического состава образцов после выдержки при температуре 800°С в течение 1 часа

Состав	NITROFESIL, %	C		N_2		O_2	
		До	После	До	После	До	После
1	0,00	40,97	42,50	0,0	0,0	16,82	13,10
2	3,20	39.97	42,20	0,96	0,10	17,42	12,30
3	6,50	38,48	39,50	1,95	1,60	16,82	12,60
4	10,00	36,87	41,90	3,00	2,60	16,21	12,20
5	12,50	35,73	23,30	3,75	3,00	16,82	12,20
6	15.00	34,58	38,50	4,5	4.00	15,32	10,50

Таблица 3. Изменение химического состава образцов после выдержки при температуре 1000°С в течение 1 часа

Состав	NITROFESIL, %	C		N_2		O_2	
		До	После	До	После	До	После
1	0,00	40,97	43,30	0,00	0,00	16,82	15,70
2	3,20	39.97	43,00	0,96	0,10	17,42	14,10
3	6,50	38,48	40,60	1,95	1,60	16,82	15,00
4	10,00	36,87	39,20	3,00	2,60	16,21	13,90
5	12,50	35,73	24,4	3,75	3.00	16,82	13,40
6	15.00	34,58	37,6	4,50	4,00	15,32	13,20

Таблица 4. Изменение химического состава образцов после выдержки при температуре 1200°С в течение 1 часа

Состав	NITROFESIL, %	C		N_2		O_2	
		До	После	До	После	До	После
1	0,00	40,97	43,10	0,00	0,00	16,82	15,60
2	3,20	39.97	42,90	0,96	0,10	17,42	13,50
3	6,50	38,48	42,40	1,95	1,60	16,82	13,90
4	10,00	36,87	39,80	3,00	2,60	16,21	14,40
5	12,50	35,73	24,20	3,75	3.00	16,82	11,50
6	15.00	34,58	38,20	4,50	4,00	15,32	12,30

Таблица 5. Изменение химического состава образцов после выдержки при температуре 1450°С в течение 3 часов

Состав	NITROFESIL, %	C		N_2		O_2	
		До	После	До	После	До	После
1	0,00	40,97	45,20	0,0	0	16,82	1,60
2	3,20	39.97	44,30	0,96	0	17,42	1,20
3	6,50	38,48	37,70	1,95	0	16,82	14,50
4	10,00	36,87	39,10	3,00	0	16,21	1,50
5	12,50	35,73	36,40	3,75	0	16,82	11,60
6	15.00	34,58	37,30	4,5	0	15,32	11,20
образец из канала летки ДП №6 ПАО «ММК»	6,50	38,48	41,90	1,95	0	16,82	14,30

Таблица 6. Результаты рентгенофазового анализа спеченного образца № 6 (выдержка в течение 3 часов при температуре 145 °С)

Компонент	Содержание по массе, %
SIC(MCISSANITE)	42.2
C (GRAFIT)	40.9
Al_2O_3(ALPHA)	11.7
$FeSi_3$ (Iron Silicide)	2.3
SiO_2(QUARTZ)	1.0
Al_2SiO_5_kyanite_tric	0.7

Из данных таблицы видно, что произошло восстановление оксида SiO_2 (изначальное его содержание в леточной массе было около 16,4%). Кроме того, произошло разложение нитрида кремния на составляющие, так как в конечном составе не обнаружен N_2.

В результате, можно, во-первых, предположить, что произошло восстановление оксида кремния из шихтовых материалов до карбида кремния, так как его суммарное содержание резко увеличивается.

А во вторых, на основе первых данных можно предположить, что в канале летки и в окололеточном пространстве внутри печи по достижении температуры ~1400°С нитрид кремния разлагается, а выделившийся в результате реакции кремний реагирует с углеродом с образованием вторичного карбида кремния.

При наличии силицида железа, плавящегося при ~1200°С, образование карбида кремния происходит через расплав с выделением удлиненных кристаллов β-SiC, которые, вырастая, формируют переплетенную сеть. Эта сеть связывает воедино все огнеупорные компоненты леточной массы, образуя прочный, стойкий к эрозии каркас.

Для подтверждения этой теории в условиях доменного цеха ПАО «ММК» был проведен ряд экспериментов, который заключался в заливке образцов леточной массы в песочной ванне жидкими чугуном и шлаком, отобранными из желобов во время выпуска. Полученные образцы отправлены на проведение рентгенофазового анализа (рисунок 2).

Рис. 2. Эксперимент по заливке образцов леточной массы в песочной ванне жидкими чугуном и шлаком

М.Ю. Ширшов, В.Г. Дружков,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»
И.Е. Прохоров, ПАО «ММК»

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРЯЧЕГО ДУТЬЯ ПО ФУРМАМ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Равномерное распределение газов по окружности доменной печи является одним из условий, определяющих высокую эффективность доменной плавки. Неравномерность распределения горячего дутья по фурмам снижает технико-экономические показатели работы доменной печи [1–4].

Причинами образования такой неравномерности могут быть [1–4]:

— односторонний подвод горячего дутья под прямым углом к кольцевому воздухопроводу, в результате чего расход его на фурмах в секторах ввода и диаметрально противоположных ему выше;
— подвод дутья к кольцевому воздухопроводу в двух местах сверху увеличил количество секторов с повышенным расходом дутья по фурмам. Такая схема подвода была реализована на доменной печи № 9 полезным объемам 5037 м^3 «Криворожстали» и доменной печи № 5 с полезным объемом 5580 м^3 «Северстали» [4];
— разная газопроницаемость материалов в надфурменных зонах из-за неравномерного окружного распределения шихты;
— изменение сечения фурм при зарастании их шлаком;
— работа печи с перекосом поверхности засыпи шихты на колошнике;
— искажение профиля печи в связи с излишним разгаром футеровки (в секторах над чугунными и шлаковыми летками), образованием настылей и гарнисажа излишней толщины;
— неполное смешивание горячего и холодного воздуха при работе смесительного клапана;
— разные величины архимедовой силы по секторам горна на выпуске, а значит и скорости схода и разрыхленности материалов;

— геометрия фурменных рукавов, попадание в конфузоры фурменных приборов фрагментов огнеупорных изделий при частичном разрушении камеры горения воздухонагревателей и воздухопровода горячего дутья.

Удалось выявить новые причины неравномерного распределения дутья по фурмам. Например, место врезки в кольцевой воздухопровод устройства для взятия печи «на тягу», которое создает дополнительную турбулентность потока горячего дутья в этом секторе.

Повышение равномерности распределения дутья по фурмам будет способствовать лучшему использованию тепловой и химической энергий газа.

Исследования показали, что не менее эффективным может быть совершенствование конструкции узла подвода горячего дутья к кольцевому.

На кафедре «Металлургия черных металлов» (МЧМ) МГТУ им. Г.И. Носова была поставлена задача изучить влияние подвода горячего дутья к кольцевому воздухопроводу доменной печи по одному из трех вариантов, в зависимости от конкретных условий:

— первый вариант (рисунок 1а): односторонний подвод горячего дутья к кольцевому воздухопроводу доменной печи, выполненный перпендикулярно, при этом диаметры кольцевого и прямого воздухопроводов одинаковы;
— второй вариант (рисунок 1б): односторонний подвод дутья к кольцевому воздухопроводу доменной печи, выполненный не перпендикулярно, а тангенциально (по касательной), при этом диаметры кольцевого и прямого воздухопроводов одинаковы;
— третий вариант (рисунок 1в): двусторонний подвод дутья (с двумя местами врезки в диаметрально противоположных направлениях) к кольцевому воздухопроводу доменной печи, выполненный не перпендикулярно, а тангенциально (по касательной), при этом диаметры кольцевого и прямого воздухопроводов одинаковы.

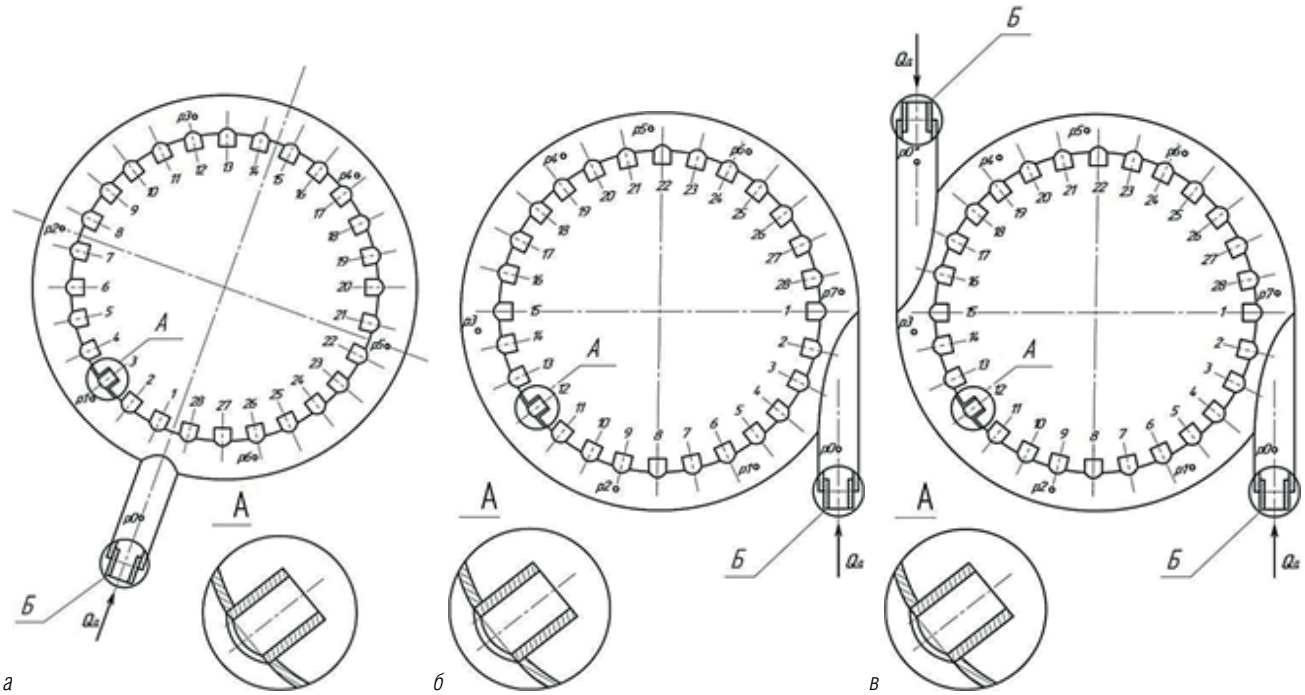


Рис. 1. Общий вид кольцевого воздухопровода на модели доменной печи

$V_п$=3200 м³ (М 1:50): 1–28 — фурменные приборы; p_0,p_0'— p7 — отверстия для отбора статического давления; $Q_д$ — подача дутья

Работы проводились в лаборатории физического моделирования доменного процесса на круглой разъемной модели доменной печи с полезным объемом ($V_п$) 3200 м³, выполненной из оргстекла в масштабе 1:50 (без загрузки и с загрузкой шихтовых материалов), с перпендикулярным и тангенциальным

подводами прямого воздухопровода горячего дутья к кольцевому, при этом диаметры кольцевого и прямого воздухопроводов одинаковы. Сыпучей средой служила смесь шамотной (фракции 0,8–1,8 мм) и агломерационной (фракции 0,85–1,6 мм) крошек с насыпной плотностью 1,325 г/см^3. На модели в кольцевой воздухопровод подавался холодный воздух (t≈22 °С) с помощью лабораторных воздуходувок. Скорость истечения дутья из патрубков воздуходувки и через фурмы определяли с помощью термоанемометра ТТМ-2-01.

В ходе исследования на физической модели доменной печи проведена серия экспериментов, которые в целом можно разделить:

— исследования равномерности распределения дутья по фурмам без загрузки шихтовых материалов;
— исследование распределения полного давления по кольцевому воздухопроводу с загрузкой шихтовых материалов;
— компьютерное моделирование потоков дутья.

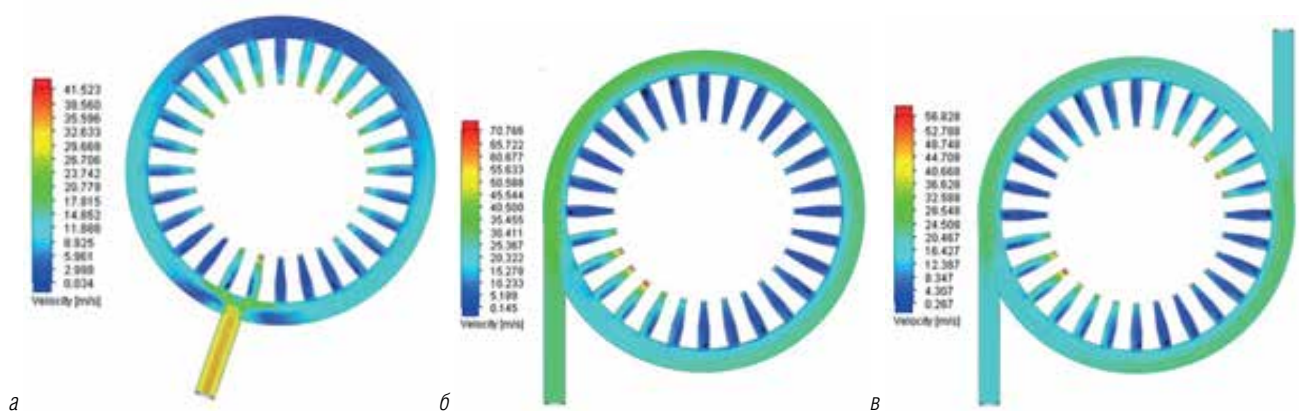
При одностороннем перпендикулярном подводе (скорость дутья из патрубка воздуходувки 30 м/с) среднее значение скорости ($\upsilon_{ср.}$) составило 17,3 м/с, максимальное отклонение от среднего значения (δ) — 5,9%; при одностороннем тангенциальном подводе (скорость дутья из патрубка воздуходувки 30 м/с) $\upsilon_{ср}$=17,4 м/с и δ=3,6%; при двустороннем тангенциальном подводе (скорость дутья из патрубка воздуходувки 25 м/с) $\upsilon_{ср}$=27,1 м/с и δ=2,7%.

При одностороннем перпендикулярном подводе среднее значение давления ($p_{ср.}$) составило 5,13 кПа, максимальное отклонение от среднего значения (δ) — 1,88%; при одностороннем тангенциальном подводе $p_{ср.}$=5,26 кПа и δ=1,67%; при двустороннем тангенциальном подводе $p_{ср.}$=4,41 кПа и δ=1,51%.

При одностороннем тангенциальном подводе дутья полное давление выше. Объясняется это тем, что при таком способе ввода дутья, поток, попадая в кольцевой воздухопровод, не встречая на своем пути препятствий, скользит по нему, увеличивая скорость движения и динамическое давление. В результате снижается статическое давление и расход дутья по фурменным приборам на участке ввода и диаметрально противоположного ему. Происходит закручивание потока, что позволяет поддерживать стабильность динамического напора и скорости движения потока дутья.

Другой методикой изучения движения потоков дутья в кольцевом воздухопроводе является компьютерное моделирование. На основании физической модели была разработана компьютерная модель (учитывались размеры), которая позволила изучить движение потоков дутья в кольцевом воздухопроводе.

После того как были произведены расчеты, были сформированы поля скоростей, изображенных на рисунках 2а–2в.



а *б* *в*

Рис. 2. Поля скоростей

При перпендикулярном подводе видно, что поток ударяется о стенку кольцевого воздухопровода, разбивается на два потока, при этом снижается скорость, увеличивается статическое давление (см. рисунок 2а).

В отличие от перпендикулярного подвода при тангенциальном подводе поток, не встречая на своем пути препятствий, продолжал двигаться по кольцевому воздухопроводу, при этом средние скорости и динамическое давление были значительно выше (см. рисунок 2б).

Тоже самое происходило и при двустороннем тангенциальном подводе. Создаются в кольцевом воздухопроводе два последовательно направленных друг за другом потока. Поддерживается при этом их взаимное ускорение (см. рисунок 2в).

В реальных условиях прямой воздухопровод соединяет между собой блок воздухонагревателей (3–4 штуки) и доменную печь. Блок воздухонагревателей, обычно, располагается с одной стороны, поэтому двусторонний тангенциальный подвод горячего дутья, как на модели доменной печи (см. рисунок 1б), реализовать невозможно. Предложена конструкция, представленная на рисунке 3, в которой прямой воздухопровод снабжен V-образной вставкой, одна ветвь которой напрямую соединена с входным отверстием одного патрубка кольцевого воздухопровода, а вторая ветвь указанной вставки выполнена удлиненной, в виде изогнутой по форме кольцевого воздухопровода наружной трубы, соединенной с входным отверстием другого патрубка.

На данное устройство для ввода горячего дутья получен патент № 158168 [5].

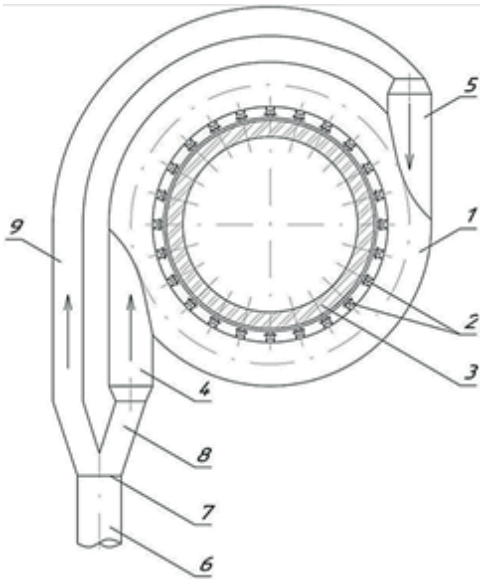


Рис. 3. Устройство для ввода горячего дутья в доменную печь:
1 — кольцевой воздухопровод горячего дутья; 2 — фурменные приборы; 3 — доменная печь; 4, 5 –патрубки; 6 — прямой воздухопровод; 7 — V-образная вставка; 8, 9 — ветви

Рассмотрены различные варианты подвода горячего дутья к кольцевому воздухопроводу, сочетания узла подвода горячего дутья в кольцевой и вывода его в фурменный прибор.

На рисунке 4 показаны узлы подвода горячего дутья к кольцевому воздухопроводу при различном угле наклона прямого воздухопровода к горизонту, а также геометрия фурменных приборов на действующих печах. Приведенные варианты не исчерпывают описания всех практически встречающихся способов сочетания подвода к кольцевому воздухопроводу и вывода из него горячего дутья.

Даны предложения по выбору рациональных вариантов подвода горячего дутья к кольцевому воздухопроводу, представленные на рисунках 5 и 6.

В случаях *б*, *г*, *д*, *е*, показанных на рисунке 5, кольцевой воздухопровод лежит в одной плоскости с прямым в отличие от случая *в*, где подвод горячего дутья выполнен под углом. Однако целесообразно при проектировании новых и реконструкции существующих доменных печей использовать сочетания *в*, *г* и *е*, так как вероятность прямого попадания струи горячего дутья в полость фурменного прибора снижается.

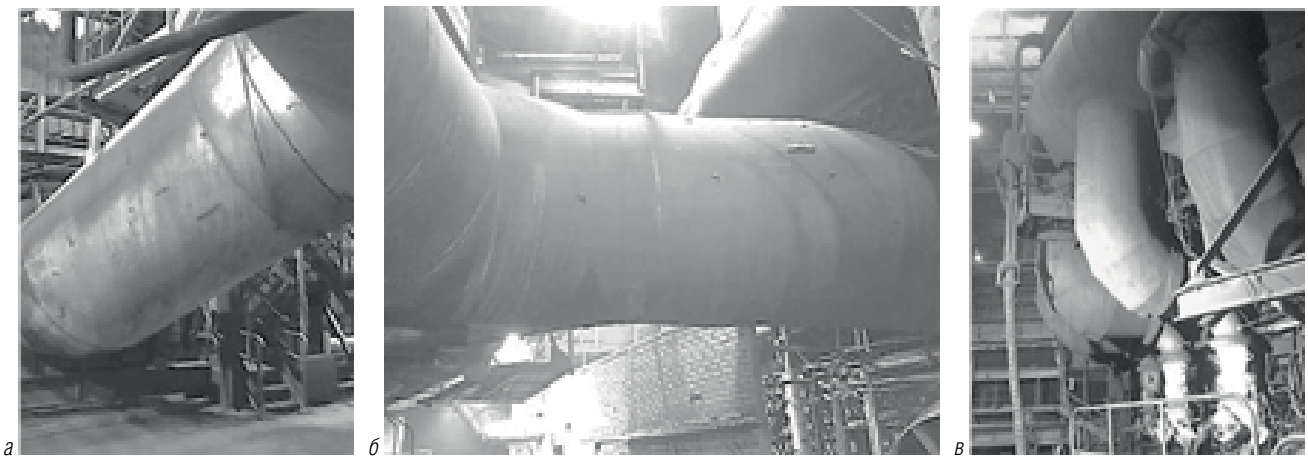


Рис. 4. Подвод горячего дутья к кольцевому воздухопроводу (а, б) и геометрия фурменных приборов (в)

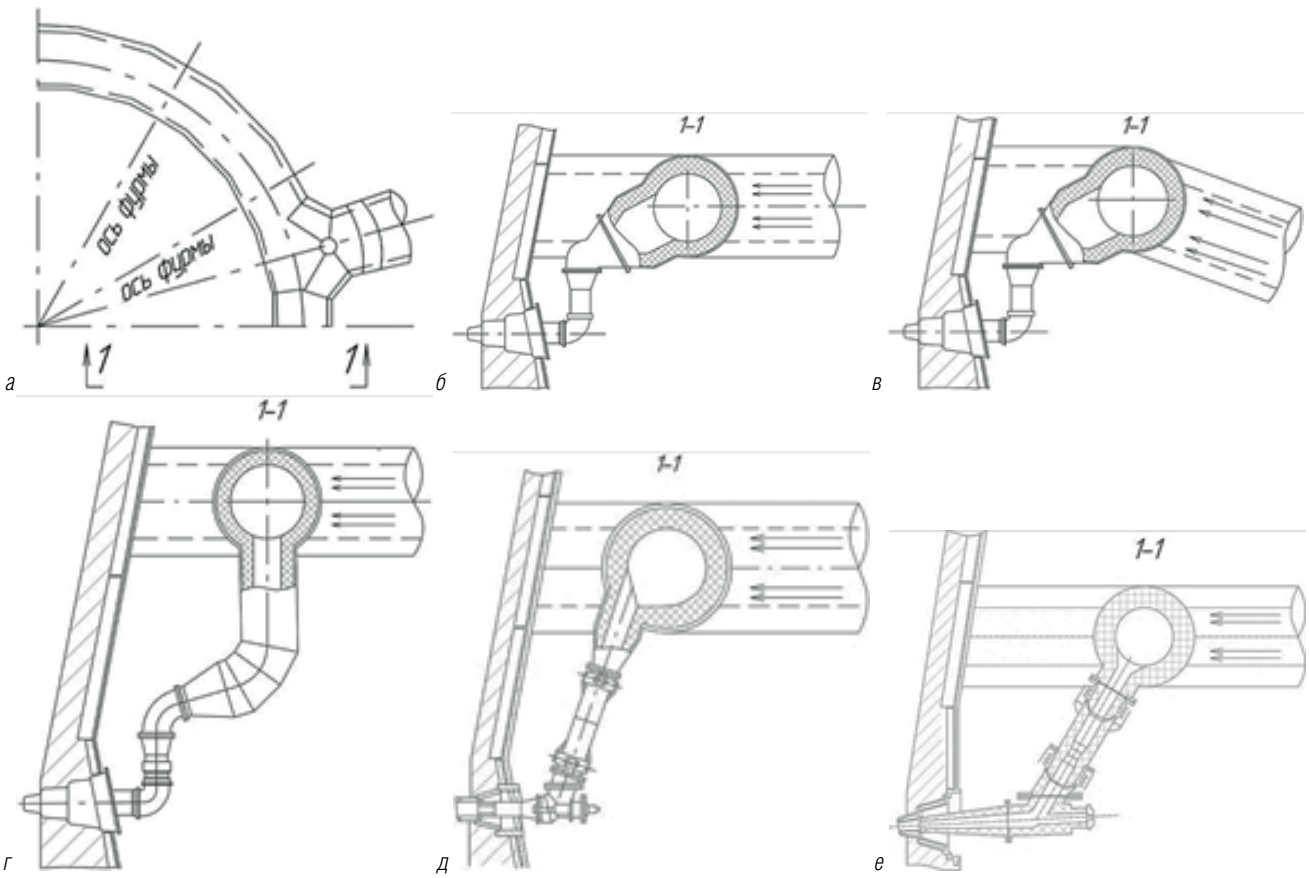


Рис. 5. Односторонний подвод горячего дутья к кольцевому воздухопроводу:
а — прямой подвод горячего дутья; б, в, г — фурменные приборы типовой конструкции; д — конструкция фурменного прибора «Гипромеза»;
е — конструкция фурменного прибора фирмы «Paul Wurth»

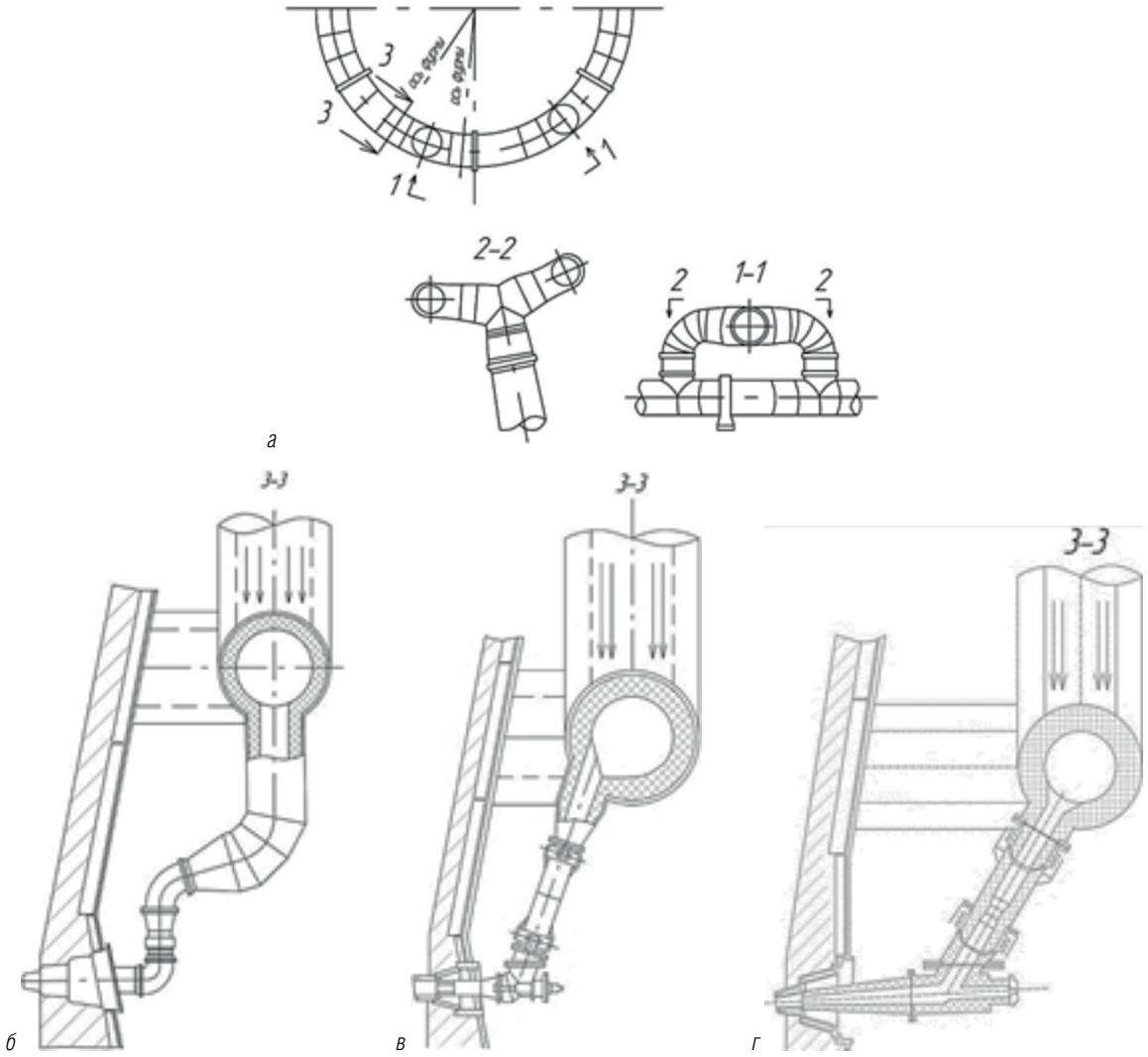


Рис. 6. Односторонний подвод (сверху) горячего дутья к кольцевому воздухопроводу с двумя патрубками: а — прямой подвод горячего дутья; б — фурменные приборы типовой конструкции; в — конструкция фурменного прибора «Гипромеза»; г — конструкция фурменного прибора фирмы «Paul Wurth»

Другой тип подвода (на рисунке 6) предполагает подвод горячего дутья сверху. Наиболее приемлемыми вариантами будут *в* и *г*. Геометрия фурменного прибора *б* гарантирует прямое попадание струи горячего дутья.

Необходимо отметить, что врезка прямого воздухопровода в кольцевой осуществляется между фурмами, но чем больше полезный объем печи, тем меньше расстояние между осями воздушных фурм, а диаметры прямого и кольцевого воздухопроводов увеличиваются существенно. Поэтому становится очевидным, что с увеличением полезного объема печи больше вероятность прямого попадания части струи горячего дутья в конфузоры фурменных приборов.

Пока не реализован тангенциальный подвод горячего дутья к кольцевому воздухопроводу на печах, предложено в секторах с повышенным расходом дутья (в местах врезки прямого воздухопровода и диаметрально противоположном ему) использовать воздушные фурмы (по 4 шт.) с увеличенным расстоянием места ввода природного газа от носка фурмы (500 мм и более), в остальных секторах — с обычным подводом (на расстоянии 250 мм от носка фурмы). Увеличение расстояния места ввода от носка фурмы с 250 до 500 будет способствовать росту времени пребывания природного газа в фурме, а зна-

чит, и степени полного сгорания его, повышения температуры газовоздушной смеси, что приведет к увеличению объема и скорости ее истечения. Сопротивление фурм проходу газовоздушной смеси возрастет, расход дутья на них уменьшится, а в остальных — увеличится.

Наличие достоверной информации о расходе дутья позволяет организовать технологический контроль за равномерностью его поступления по фурмам. Точность измерения расходов дутья на отдельно взятую фурму можно повысить выбором рациональных мест отбора импульса, а также увеличением диаметра трубок магистрали с 0,5 до 1 дюйма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании новых и реконструкции существующих доменных печей необходимо уделять внимание подводу горячего дутья к кольцевому воздухопроводу.

Повышению равномерности распределения горячего дутья по фурмам доменных печей будет способствовать:

— оснащение доменных печей кольцевым воздухопроводом с тангенциальным подводом горячего дутья;
— рациональные сопряжения прямого воздухопровода с кольцевым и сочетания конструкции узла подвода горячего дутья к кольцевому и вывода его из кольцевого воздухопровода в фурменные приборы.

Контроль и регулирование распределения дутья по фурмам доменной печи представляют значительные возможности: по расходу дутья через фурмы можно судить об изменении газопроницаемости столба шихтовых материалов в определенном секторе доменной печи, а регулирование расхода дутья по фурмам дает возможность воздействовать на распределение газового потока, оперативно бороться с каналами и продувами.

Список литературы

1. Методы определения расхода горячего дутья на отдельно взятую фурму в горне доменной печи / В.Г. Дружков, М.Ю. Ширшов, И.Е. Прохоров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. — 2015. — № 2. — С. 21–27.
2. Дружков В.Г., Ширшов М.Ю. Совершенствование конструкции узла подвода горячего дутья в «кольцевой» с целью повышения равномерности распределения дутья по окружности // Металлург. — 2016. — № 12 — С. 39–43.
3. Ширшов М.Ю. Дружков В.Г. Влияние подвода горячего дутья в кольцевой воздухопровод на распределение его по фурмам доменной печи // ОАО «Черметинформация». Бюллетень НТиЭИ. Черная металлургия. — 2016. — №8. — С. 29–38.
4. Большаков, В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки / В.И. Большаков. — Киев: Наукова думка, 2007. 410 с.
5. Патент РФ на полезную модель №158168. Устройство для ввода горячего дутья в доменную печь. Дружков В.Г., Ширшов М.Ю. Патентообладатель МГТУ им. Г.И. Носова. Опубликовано 20.12.2015 в БИ и ПМ № 35.

Отпечатано в ООО «КЕМ»
141033, Московская область, город Мытищи, микрорайон поселок Пироговский,
улица Фабричная, дом 1, подъезд 7, этаж 3, помещение 1
Тел.: (495) 363-56-12/13
www.a-kem.ru
e-mail: sekret@a-kem.ru