

ОСНОВЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ДОМЕННОЙ ПЛАВКОЙ И ОСОБЕННОСТИ ЕЕ СТРУКТУРЫ

*В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, Д.Н. Тогобицкая, Н.М. Можаренко, Ю.С. Семенов,
Н.Г. Иванча, Е.И. Шумельчик*

*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (ИЧМ),
г. Днепропетровск, Украина*

Выполненные в ИЧМ фундаментальные исследования в области совершенствования технологии доменной плавки создали научную основу для разработки автоматизированных систем контроля процессов, происходящих в доменной печи: разгара футеровки горна и лещади («Разгар»), распределения дутья по фурмам («Фурма»), контроля и прогноза шлакового режима («Шлак»), информационной системы отображения информации радиолокационного профилемера [1], а также подсистемы прогнозирования содержания кремния в чугунах на выпусках. Реализация этих автоматизированных систем контроля и прогноза в составе АСУ ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» явилась базой для создания интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой.

Каждая из систем является интегратором совокупности научных знаний, полученных при выполнении в течение ряда лет фундаментальных исследований в соответствующих направлениях. Так, при разработке системы «Шлак» получила развитие методология физико-химического моделирования структуры и свойств металлургических расплавов и процессов их взаимодействия. Автоматизированная система контроля и управления шлаковым режимом «Шлак» создана на базе фундаментальных разработок в области физико-химического моделирования расплавов и технологических приемов ведения плавки с целью обеспечения технологов инструментальными средствами для выбора оптимального шлакового режима в нестабильных сырьевых условиях для получения кондиционного чугуна с минимальными энергетическими и сырьевыми затратами [2]. Система базируется на принципиально новом подходе к стабилизации шлакового режима и критериев управления, учитывающих механизм формирования процессов шлакообразования в зависимости от интегральных параметров, характеризующих свойства шихтовых материалов с учетом их полного химического состава, а также дутьевого режима, характеризующего состояние фурменной зоны. Основными функциями системы «Шлак» являются: контроль качества чугуна и шлакового режима доменной плавки по комплексу физико-химических и технологических свойств шлака в ретроспективе и для указанного выпуска (подсистема «Контроль»); прогноз состава и свойств продуктов плавки по показателям шихты и дутьевого режима с целью выбора рационального состава шихты на этапе формирования загрузки (подсистема «Прогноз»); контроль теплового состояния горна по комплексу показателей продуктов плавки и дутьевого режима; экспертная оценка технологической ситуации с учетом теплового состояния горна, выдача управляющих рекомендаций (подсистема «Диагностика»).

В системе «Шлак» реализован нетрадиционный подход к решению задач управления качеством чугуна, основанный на прогнозировании состава и свойств продуктов плавки и стабилизации свойств конечного шлака в пределах, обеспечивающих получение чугуна требуемого состава.

Прогнозирование состава и свойств продуктов доменной плавки осуществляется на основе использования методики физико-химического моделирования структуры и свойств металлургических расплавов и процессов их взаимодействия, включающей следующий ком-

плекс физико-химических моделей: модель металлического расплава для расчета интегрального параметра — химического эквивалента состава чугуна Z^Y ; модель шлакового расплава для расчета интегральных параметров шлакового расплава: химического эквивалента состава шлака Δe и показателя стехиометрии шлака ρ ; прогнозные модели для расчета коэффициентов межфазного распределения элементов — серы, кремния, марганца, железа; прогнозные модели для расчета комплекса свойств первичных и конечных шлаков.

На базе разработанного в ИЧМ нового метода определения расхода дутья по фурмам, основанного на закономерностях теплообмена между дутьем и охлаждающей водой в головке сопла, разработана автоматизированная система контроля распределения дутья «Фурма» [3]. Основной функцией системы является контроль распределения дутья и природного газа по фурмам, для которого характерна вызванная технологическими условиями работы печи и конструктивными особенностями воздухоподводящего тракта неравномерность. Расход горячего воздуха по фурмам рассчитывается по величинам тепловых нагрузок на охлаждаемые элементы сопел фурменных приборов. Данный способ контроля предусматривает измерение перепада температуры воды и ее расхода при охлаждении сопла и является бесконтактным теплотехническим способом измерения расхода воздуха.

Алгоритмы системы предусматривают определение расходов дутья по фурмам доменной печи, параметров горновых газов, а также теоретической температуры горения, геометрических характеристик очагов горения и зоны малоподвижных материалов, расчет рекомендуемого расхода природного газа по воздушным фурмам для обеспечения равномерного температурно-теплого уровня по периметру печи.

Разработанная в ИЧМ НАНУ методика расчета теплового состояния и износа футеровки металлоприемника на базе замеров тепловых показателей работы системы периферийного и подлещадного охлаждения и температуры кладки положена в основу автоматизированной системы контроля теплового состояния системы охлаждения и остаточной толщины футеровки металлоприемника «Разгар» [4]. Система предназначена для автоматизированного контроля теплового состояния системы периферийного охлаждения, остаточной толщины футеровки периферии горна и лещади, остаточной толщины центрального стакана лещади доменной печи и эффективности технологических мероприятий по применению гарнисажеобразующих добавок [5]. Назначение системы «Разгар» — обеспечение инженерно-технического персонала достоверной информацией, позволяющей своевременно реагировать на отклонения контролируемых и расчетных параметров и выявление возможностей влияния на них. Функции системы подробно приведены в работах [4, 5].

Оригинальной, не имеющей мировых аналогов, разработкой последних 10 лет является создание информационной системы контроля поверхности засыпи шихты на колошнике, отображающей показания радиолокационной системы измерения профиля поверхности засыпи «Поверхность засыпи» [6]. Основной функцией системы измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике является его контроль для совершенствования управления распределением шихты и газового потока по сечению печи, увеличения степени использования теплового и восстановительного потенциала газового потока, обеспечения ровности хода печи, уменьшения расхода кокса, повышения производительности доменной печи и стабилизации состава чугуна [7]. Система обеспечивает технологический персонал информацией о состоянии поверхности засыпи шихты, что позволяет осуществить обоснованный выбор управляющих воздействий для оптимизации режима загрузки печи. На основе значений уровней поверхности засыпи рассчитываются параметры, характеризующие изменение поверхности засыпи шихты во времени, а именно: скорости опускания шихты в различных сечениях контролируемых радиусов, рассчитанные за время между выгрузкой порций; высоты слоев, образованные в результате выгрузки каждой порции железорудных материалов и кокса, а также их отношение, распределение уровней точек поверхности засыпи по окруж-

ности колошника печи; высота (глубина) осевой воронки профиля и смещение ее относительно оси печи.

Интеллектуальная составляющая информационной системы включает способы контроля, прогноза и управления доменной плавкой, основанные на информации профилемера: управления окружным распределением шихтовых материалов [8]; прогноза содержания кремния в чугуна на выпуске продуктов плавки [9]; оценки газодинамического режима работы печи [10]; определения положения пластичной зоны [11].

Разработанные ИЧМ автоматизированные системы контроля параметров технологического состояния плавки функционируют с 2003 года в составе АСУ ДП № 9 ПАО «Арселор-Миттал Кривой Рог». Такая совокупность автоматизированных систем контроля открыла возможность их интегрирования в единый комплекс для создания эффективной автоматизированной системы поддержки принятия решений по управлению ходом доменной печи с целью его стабилизации, минимизации энергозатрат и получения кондиционного по сере и кремнию чугуна.

Разрабатываемая система предполагает функционирование структурных комплексов (подсистем), которые в свою очередь состоят из отдельных блоков. Основными структурными комплексами являются: контрольно-измерительный; расчетный; модельный; прогнозный и управляющий.

Контрольно-измерительный комплекс – «База данных» (БД) – является информационной моделью и отображает состояние процесса. Отличительной особенностью организации данных в БД является их интегрирование и обеспечение многопользовательского режима. Важной особенностью формирования баз данных разрабатываемой для условий ДП № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» интеллектуальной системы поддержки принятия решений является объединение в комплекс традиционно контролируемых технологических параметров и расчетных показателей плавки, а также информации, поступающей от автоматизированных систем контроля доменной плавки, которая является важным дополнением исходных данных.

Расчетная подсистема интегрирует в своем составе три блока:

1. *Блок расчета новых интегральных критериев*, предназначенных для оценки: теплового состояния доменной печи (K_t), хода печи (K_{hp}), [12] обобщенного показателя доменной шихты ($K_{ш}$) и оценки формы, положения и газопроницаемости пластичной зоны ($K_{пз}$). На основе анализа различных режимов работы доменной печи определяются оптимальные диапазоны изменения критериев. По результатам совокупного рассмотрения значений критериев, их сопоставления с оптимальными диапазонами изменения, а также анализом характерных для исследуемых периодов работы печи технологических параметров и показателей плавки, выходных данных автоматизированных систем контроля, осуществляется диагностика хода печи с выявлением факторов, вызывающих его нарушения. При отклонении значений критериев от оптимальных по результатам анализа факторов, вызвавших отклонение, производится предварительный расчет рекомендаций по управлению ходом доменной плавки (изменение программы загрузки и параметров дутьевого режима).

2. *Блок расчета положения, конфигурации и толщины пластичной зоны*. Расчет базируется на методе определения формы и положения пластичной зоны на основе показаний профилемера, в дополнение к которому в случае отсутствия возможности получения исходной информации (аварийный выход из эксплуатации измерителя) может привлекаться математическая модель определения положения линии плавления и эффективной площади плавления. Определение с помощью математических моделей выгрузки шихтовых материалов из бункера БЗУ и радиального распределения шихты на колошнике компонентного состава материалов в зонах сечения колошника позволит определить толщину пластичной зоны. Системная реализация этих подходов позволит рассчитать основные параметры пластичной зоны, а так-

же определить критерий ее оценки, который используется для оптимизации хода доменной плавки. Если данный критерий изменяется в оптимальном диапазоне, то полученная пластичная зона обеспечивает наиболее эффективный ход доменной печи. В противном случае путем изменения программы загрузки шихты осуществляется корректировка формы и/или положения пластичной зоны для обеспечения условий оптимизации. При этом определяются параметры критерия, вызвавшие отклонение его величины от установленного диапазона.

3. *Блок расчета материально-теплового баланса*, алгоритмы которого используются для оценки текущего состояния доменной плавки и динамической направленности характера распределения массы и энергии процесса, позволяющие оператору печи принимать корректирующие решения на основании выдаваемых рекомендаций. Для успешного управления процессом плавки в этот блок включен расчет прогнозирования хода печи при изменении параметров загрузки и дутья. Получаемые в результате расчетов параметры и характеристики доменной плавки при работе в различных шихтовых условиях в предшествующих периодах позволяют оценивать экономичность доменной плавки.

Модельная подсистема состоит из трех блоков, каждый из которых представляет определенную функциональную математическую модель.

1. Математическая модель опускания слоев шихты, сформированных на колошнике, в шахте доменной печи. Результаты моделирования позволяют сформировать структуру пластичной зоны, рассчитать ее газодинамику.

2. Модель, синтезированная на основе объединения двух моделей – выгрузки шихтовых материалов из бункера БЗУ и распределения материалов на колошнике, позволяющая определить распределение компонентов шихтовых материалов в зонах сечения колошника.

3. Математическая модель газодинамики пластичной зоны печи, участвующая в решении оптимизационной задачи.

Прогнозирующая подсистема состоит из трех блоков, реализующих два способа прогнозирования содержания кремния в чугуне: первый – основан на рассчитанной по данным профилемера скорости опускания поверхности шихтовых материалов в осевой зоне печи; второй – на основе алгоритмов автоматизированной системы «Шлак». Третий блок этого комплекса позволяет путем расчетов материально-теплового баланса текущей плавки выявлять отклонения от номинальных расходов топлива и дутьевых добавок, прогнозировать изменения хода печи при принятии и реализации управляющих воздействий.

Управляющая подсистема объединяет способ регулирования теплового состояния горна печи с помощью модели теплового состояния печи; методы управления доменной плавкой, изменением распределения шихтовых материалов на колошнике и их свойств. Следует отметить особенность формирования рекомендаций по изменению параметров загрузки шихты, которая состоит в системной оценке информации, поступающей от профилемера, и выходных параметров оптимизации формы и положения пластичной зоны в доменной печи. Таким образом, предварительные рекомендации по корректировке программ загрузки либо дутьевых параметров на выходе из управляющего структурного комплекса системы будут сформированы исходя из совокупного определения управляющих воздействий с помощью способа регулирования распределения материалов, основанного на поступающей от профилемера информации, и воздействий, направленных на обеспечение оптимальных формы и положения в печи пластичной зоны, обеспечивающих достижение высоких технико-экономических показателей плавки. Формирование окончательных рекомендаций по управлению ходом доменной печи осуществляется на основе согласованного рассмотрения и экспертной оценки предварительных рекомендаций отдельных структурных комплексов системы.

Показателями (целевой функцией) технологической эффективности работы печи, технологического персонала и информационной системы являются: удельный расход кокса, производительность печи, выход кондиционного чугуна по содержанию серы в чугуне,

температура жидких продуктов плавки в соответствии с требованиями последующего сталеплавленного передела. При этом должны быть выполнены соответствующие ограничения технологии доменной плавки, обеспечивающие минимальную вероятность попадания технологического состояния печи в так называемые критические области (критические, аварийные режимы работы).

Важным составляющим модулем интеллектуальной системы является **подсистема диагностики хода доменной печи**. Функционирование подсистемы обеспечивается анализом поступающей из структурных комплексов информации. Подсистема представляет собой программный модуль, предназначенный для раннего обнаружения намечающихся расстройств доменной печи. Экспертная система обеспечивает возможность идентификации ровного хода печи и диагностирует его развитие или нарушение.

Представление технологическому персоналу необходимой информации о ходе доменной плавки осуществляется с помощью **подсистемы отображения информации**. При этом поддерживаются два режима: автоматический (постоянный вывод информации на монитор компьютера); диалоговый (по запросу пользователя).

Подсистема также обеспечивает визуализацию промежуточных и конечных результатов функционирования структурных комплексов интеллектуальной системы, в том числе предварительных и окончательно сформированных рекомендаций по изменению параметров загрузки шихтовых материалов либо параметров дутьевого режима плавки.

Интеллектуальная система находится в стадии разработки. Особенности функционально-алгоритмического взаимодействия структурных комплексов интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой будут уточнены в процессе разработки.

Список литературы

1. Доменное производство «Криворожстали». Монография под ред. чл.-корр. НАНУ В.И. Большакова / В.И. Большаков, А.В. Бородулин, Н.А. Гладков, Н.Г. Иванча, А.В. Кекух, Г.П. Костенко, В.С. Листопадов, Н.М. Можаренко, И.Г. Муравьева, А.С. Нестеров, Г.И. Орел, А.В. Сокурено, Д.Н. Тогобицкая, В.А. Шеремет, С.Т. Шулико, Ф.М. Шутылев. ИЧМ НАНУ, «Криворожсталь». Дн-ск, Кр. Рог. 2004. — 378 с.
2. Опыт создания и внедрения системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки в шихтовых и технологических условиях заводов Украины/[Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И., Хамхотько А.Ф., Степаненко Д.А., Оторвин П.И., Нынь С.В.] — Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2009. — Вып. 19. — С. 100–112.
3. Автоматизированная система контроля расхода дутья по воздушным фурмам доменной печи/[Можаренко Н.М., Канаев В.В., Параносенков А.А., Панчоха Г.В., Орел Г.И., Листопадов В.С., Дмитренко К.А.] — Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2005. — Вып. 11. — С. 34–42.
4. Система контроля разгара футеровки металлоприемника и формирования продуктов плавки в доменных печах КГГМК «Криворожсталь»: Теория и практика производства чугуна, труды международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь»/Н.М. Можаренко, Д.Н. Тогобицкая, Г.В. Панчоха и др. — 2004. — С. 511–514.
5. Современные методы контроля остаточной толщины футеровки металлоприемника доменной печи/[Д.А. Пинчук, Г.В. Панчоха, В.В. Канаев, Н.М. Можаренко]. — Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2005. — Вып. 11. — С. 247–253.
6. Муравьева И.Г. Новые возможности автоматизированного управления ходом доменной печи/И.Г. Муравьева. — Металлургическая и горнорудная промышленность, 2010. — №. 3 — С. 126–129.
7. Большаков В.И. Применение радиолокационных систем измерения поверхности засыпи шихты для контроля и управления доменной плавкой/В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, Ю.С. Семенов. — Днепрпетровск: Пороги, 2013. — 364 с.
8. Пат. на изобретение, Украина, UA 87237 С2. Способ управления окружным распределением шихтовых материалов на колошнике доменной печи/Большаков В.И., Шутылев Ф.М., Муравьева И.Г., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Листопадов В.С., Дмитренко К.А. — заявл. 02.01.08; опубл. 25.06.09. Бюлл. № 12, 2009 г.
9. Прогнозирование теплового состояния горна доменной печи/В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, Ю.С. Семенов, С.Т. Шулико, Е.И. Шумельчик//Сталь, 2009, № 5. — С. 7–9.

**Труды научно-практической конференции с международным участием
и элементами школы молодых ученых**

**«ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛУРГИИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАВЕРШЕННЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И НИОКР»**

Екатеринбург, 3–5 июня 2015 г.

Рекомендовано к изданию ученым советом Института металлургии УрО РАН
протокол № 4 от 10.04.2015

*Ответственный за выпуск
научный сотрудник ИМЕТ УрО РАН, к. т. н. Витькина Г.Ю.*



Подписано в печать _____ . Формат _____ .
Бумага офсетная. Усл. печ. л. ____ . Тираж 250 экз. Заказ ____ .

Институт металлургии УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, тел./факс: (343) 267-91-24
e-mail: admin@imet.mplik.ru

Отпечатано в ОАО «ИПП «Уральский рабочий»
620075, г. Екатеринбург, ул. Тургенева, 13
<http://www.uralprint.ru>, e-mail: sales@uralprint.ru