

В.И.Большаков, И.Г.Муравьева, Н.Г.Иванча

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКОЙ

Институт черной металлургии НАН Украины

Представлены результаты фундаментальных исследований, выполненных в течение последних пяти лет (2009 – 2013 гг.) группой машин доменного производства отдела технологического оборудования и систем управления. Усовершенствованы и разработаны способы, устройства и математические модели для управления доменной плавкой и загрузки шихтовых материалов. Приведены примеры реализации результатов исследований на металлургических предприятиях.

Ключевые слова: доменная плавка, устройства, шихтовые материалы, математические модели, управление

В течение последних пяти лет (2009 – 2013 гг.) группой машин доменного производства (ТО – 1) отдела технологического оборудования и систем управления (ОТОСУ) совместно с отделом металлургии чугуна (ОМЧ), отделом физико-химических проблем металлургических процессов (ОФХП) и отделом металлургии стали (ОМС) выполнен комплекс работ, направленных на разработку новых и совершенствование существующих способов, систем и отдельных устройств контроля и управления доменной плавкой, математических моделей, описывающих процессы подготовки шихтовых материалов к доменной плавке, их загрузки и распределения на колошнике, формирования поверхности засыпи, структуры столба шихты в целом и его вязкопластичной зоны.

Следует отметить важнейшие работы ведомственной тематики, выполнявшиеся в течение 2009 – 2013 г.г. **ТО.003.08 «Развитие научных и технологических основ повышения эффективности плавки с использованием современных средств измерения профиля засыпи шихты»** (2008 – 2010 г.г.) и **ТО.003.11 «Разработка научно обоснованной технологии загрузки доменных печей, оснащенных бесконусными загрузочными устройствами, многокомпонентными смешанными порциями шихтовых материалов»** (2011 – 2013 г.г.).

При выполнении НИР ТО.003.08 научно обосновано комплексное использование информации стационарных систем измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике для выявления новых закономерностей и взаимосвязей процессов с последующим их применением для прогнозирования хода доменной плавки и обоснования выбора управляющих воздействий [1]. В процессе исследований определено, что в верхней части шахты величина отклонения вертикальной скорости опускания шихты в отдельных точках от средней по радиусу уменьшается в 1,6–2,6 раза, по сравнению с колошником, что

свидетельствует о выравнивании распределения скоростей по радиусу печи. Впервые на основе экспериментальных исследований установлена взаимосвязь скоростей опускания шихтовых материалов в осевой зоне колошника печи с содержанием кремния в чугуна на выпуске, наличие которой объясняется максимальным долевым влиянием восстановленного в осевой зоне печи кремния на конечное его содержание в чугуна, являющееся результатом смешивания чугуна, поступающего из областей с различным содержанием кремния. Установленная взаимосвязь явилась предпосылкой разработки нового метода оперативного прогнозирования содержания кремния в чугуна. Показана и обоснована связь коэффициентов нестабильности опускания поверхности шихтовых материалов в радиальных кольцевых зонах колошника с показателями газодинамического режима плавки. На основе полученных взаимосвязей разработаны методы оценки ровности опускания шихты и газодинамического режима доменной плавки, которые опробованы в условиях ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» и рекомендованы для реализации в составе АСУ доменных печей, оснащенных стационарными системами измерения профиля поверхности засыпи шихты на колошнике. Установлена взаимосвязь отношения высот слоев железосодержащих материалов и кокса как показателя распределения шихтовых материалов по радиусу и окружности колошника с коэффициентами нестабильности опускания шихты в зонах сечения колошника, что позволяет использовать эти коэффициенты для обоснования необходимости изменения режима работы печи. Полученные при выполнении НИР ТО.003.08 результаты использованы для создания реализованных на практике разработок ОТОСУ, в том числе:

- технологических заданий на установку стационарных систем измерения профиля поверхности засыпи шихты на доменных печах №8 и №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» и №2 ПАО «Алчевский МК»;

- методов расчета параметров поверхности засыпи шихты: углов откоса поверхности шихтовых материалов; глубины и смещения осевой воронки; формы, толщины слоев выгруженных порций шихты по контролируемым радиусам колошника и их отношения, а также методов определения скоростей схода шихтовых материалов в различных сечениях, функционирующих в составе математического обеспечения информационных систем АСУ ДП №8 и ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог»;

- способа управления окружным распределением шихтовых материалов на колошнике, основанного на использовании информации профиломера (функционирует в составе АСУ загрузкой ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог»);

- метод прогнозирования содержания кремния в чугуна по изменению скоростей опускания шихтовых материалов, реализованный в составе АСУ ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

При выполнении **ГО.003.11 «Разработка научно обоснованной технологии загрузки доменных печей, оснащенных бесконусными загрузочными устройствами, многокомпонентными смешанными порциями шихтовых материалов»** получены следующие новые научные результаты [2]:

- впервые установлена зависимость содержания окатышей в пристеночной зоне колошника от массы головной части железорудной смешанной порции, на основе которой разработан новый метод расчетного определения рациональных параметров формирования железорудных смешанных порций для доменных печей с конвейерной и скиповой доставкой шихты на колошник;

- впервые установлены закономерности распределения массы дозы добавок, загружаемых в составе смешанных порций, по радиусу колошника для доменных печей с конвейерной и скиповой доставкой шихты на колошник;

- предложен новый подход к выбору рациональных параметров формирования коксовых смешанных порций, состоящих из кокса различного качества;

- в ходе экспериментальных исследований установлены особенности выгрузки многокомпонентных смешанных порций из бункера БЗУ, характеризующие изменение компонентного состава выгружаемого потока;

- разработаны формализованные технологические требования к распределению шихтовых материалов при загрузке многокомпонентных смешанных порций.

Практическая значимость полученных научных результатов подтверждается их применением при выборе рациональных параметров формирования и загрузки смешанных порций различного вида в условиях использования многокомпонентной шихты на доменных печах Украины (ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», ДП №3 ПАО «Енакиевский металлургический завод», ДП №1 ПАО «Алчевский металлургический комбинат») и Российской Федерации (ДП №4 и ДП №5 ОАО «Северсталь», ДП №1 ОАО «Косогорский металлургический завод»).

В НИР **ОС.013.11 «Научное обоснование и разработка метода использования электрических воздействий при внепечной обработке чугуна и способа контроля процессов в доменной печи»** выполнены исследования, в процессе которых впервые установлены связи значений электропотенциалов, регистрируемых между фурмами и кожухом доменной печи, с параметрами поверхности засыпи шихты на колошнике, а также содержания кремния в чугуне на выпуске с градиентом изменения разности электропотенциалов, регистрируемых между фурмой и кожухом доменной печи [3].

Практическое значение результатов этой работы заключается в следующем:

- тесная связь потенциалов с расходами дутья и природного газа на фурмах позволяет осуществить оценку распределения дутья по воздушным фурмам, что особо актуально для доменных печей не имеющих соответствующих систем автоматизированного контроля;

- установленная связь электропотенциала с расходом природного газа на фурмах может быть использована для разработки способа регулирования и повышения равномерности теплового состояния горна доменной печи путем изменения расхода природного газа;

- зависимость электропотенциалов от параметров поверхности засыпи шихты на колошнике, установленная на доменной печи, оснащенной стационарной системой контроля поверхности засыпи, после проведения дополнительных исследований и обобщения результатов может быть использована для контроля и оценки процессов опускания шихты на других доменных печах;

- установленная связь изменения содержания кремния в чугуне предшествующих смежных выпусков с электропотенциалами, регистрируемыми между фурмами и кожухом печи, в тех же выпусках может быть использована для прогнозирования содержания кремния в чугуне последующего выпуска, что позволит принимать превентивные управляющие воздействия и тем самым будет способствовать уменьшению расхода кокса.

В рамках целевой тематики выполнены два проекта по программе «Ресурс» и проект по программе «Фундаментальные проблемы создания материалов с заданными свойствами, методов их соединения и обработки». В проекте целевой программы «Ресурс» в 2007 - 2009 г.г. **«Разработка показателей надежности и технологических основ выбора решений по управлению, обеспечивающих безопасность и технологическую устойчивость доменных печей»** выполнены следующие разработки и исследования по обеспечению безопасной и устойчивой работы доменных печей в нестационарных режимах эксплуатации (выдувках и задувках) [4]:

- на основании обобщения результатов исследований, опыта выдувок и задувок доменных печей, определено влияние технологических, технических и организационных факторов доменного процесса на эффективность и безопасность эксплуатации доменных печей в нестационарных условиях работы;

- разработаны новые технологические приемы, технические решения и методы оценки состояния конструкций доменных печей, обеспечивающие эксплуатационную безопасность, технологическую устойчивость и продление эксплуатационного ресурса доменных печей при их остановках на капитальные ремонты, непродолжительную консервацию и при вводе в эксплуатацию после строительства или капитальных ремонтов;

- промышленное опробование разработанных технологических и организационно-технических требований и положений по безаварийной выдувке и задувке доменных печей при капитальных ремонтах и остановках, проведенное на крупнейшей в Украине доменной печи №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог», показало высокую эффективность и перспективность их применения на доменных печах большого и среднего объема. Разработанные положения технологического регламента безопасной выдувки и задувки доменных печей большого и среднего объема рекомендованы Объединением предприятий «Металлургпром» и Ассоциацией «Центр подготовки сырья и выплавки чугуна» для использования в «Типовой технологической инструкции отрасли» и технологических инструкциях по задувке и выдувке доменных печей металлургических заводов и комбинатов Украины.

К основным научным и практическим результатам выполнения проекта программы «Ресурс» 2010 – 2012 г.г. **«Разработка и реализация в составе АСУ доменной печи, оборудованной бесконусным загрузочным устройством и современной системой измерения профиля поверхности засыпи шихты, автоматизированных способов контроля, прогноза и управления плавкой»** следует отнести [5]:

- усовершенствование способа прогнозирования содержания кремния в чугуне с помощью регрессионного выражения, в котором, помимо теоретической температуры, в качестве регрессоров выступают скорость опускания поверхности шихтовых материалов в осевой зоне колошника, средняя рудная нагрузка и содержание пара в дутье, определяемые с учетом времени сдвига этих параметров.

- разработку способа регулирования теплового состояния горна доменной печи, предусматривающего прогноз содержания кремния в чугуне за 3 часа до выпуска продуктов плавки и выдачу рекомендаций, направленных на изменение рудной нагрузки или влажности дутья в зависимости от текущего теплового состояния горна;

- разработку программного обеспечения и алгоритма функционирования подсистемы прогнозирования содержания кремния в чугуне в составе АСУ ДП №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»;

- разработку критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника доменной печи, с использованием которого предложен метод прогнозирования толщины гарнисажа металлоприемника в нестационарных условиях работы печи.

В 2009 - 2011 г.г. выполнялась завершающая стадия проекта целевой программы **«Фундаментальные проблемы создания материалов с заданными свойствами, методов их соединения и обработки» «Разработка научных положений и информационно-моделирующей системы для обоснованного выбора экономичных энергосберегающих режимов доменной плавки при различном составе шихтовых материалов, особенностях их распределения и термо-физико-химических**

превращений в объеме печи» [6]. В процессе завершения этого проекта на основе синтеза комплекса взаимно увязанных математических моделей, описывающих физические, химические, газодинамические и тепловые процессы, как составляющие процесса доменной плавки, разработана информационно-моделирующая система, при помощи которой может осуществляться анализ и обоснованный выбор параметров загрузки шихты с целью разработки энергосберегающих режимов доменной плавки. разработана методика оценки параметров зоны размягчения и плавления (ЗРП) с учетом влияния степени восстановления железа и прихода щелочных оксидов (K_2O+Na_2O), позволяющая повысить системность анализа процессов и получить количественную оценку влияния параметров на показатели плавки. При выполнении проекта получен также ряд важных результатов, в частности, установлена связь вариации скоростей опускания шихтовых материалов на колошнике с изменением границ пластичной зоны и разработан метод определения ее положения в доменной печи с использованием информации профилемера, основанный на определении экстремальных изменений среднеквадратического отклонения скорости опускания в течение заданного периода.

Полученные при выполнении ведомственных работ научные результаты реализованы на предприятиях металлургической отрасли при выполнении НИР по хозяйственным договорам.

Ниже приведены основные практические результаты, которые были использованы в виде технологических мероприятий, проектных решений и инженерных инструментов на доменных печах.

ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог»:

- разработана и внедрена в составе АСУ ДП №9 подсистема прогнозирования содержания кремния в чугуне на выпусках, основанная на взаимосвязи скоростей опускания шихтовых материалов в осевой зоне колошника печи с содержанием кремния в чугуне на выпуске. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения метода прогнозирования содержания кремния в чугуне составляет 1065384 грн. [1];

- внедрены рациональные параметры режима загрузки задувочной шихты, обеспечивающие уменьшение истирающего воздействия потоков шихты на огнеупорную кладку шахты и низа печи, а также попадания железорудных материалов в осевую зону печи. Рациональные параметры загрузки задувочной шихты обеспечили формирование газораспределения с умеренно развитым газовым потоком в осевой зоне печи, что способствовало эффективному прогреву столба шихтовых материалов во время задувки и раздувки ДП №9.

ПАО «Алчевский металлургический комбинат»:

- разработан, обоснован, внедрен и освоен рациональный режим загрузки шихтовых материалов в ДП №1. Внедрение и освоение предложенного режима загрузки обеспечило формирование

рационального распределения шихтовых материалов по радиусу и окружности печи при увеличении пропускной способности системы загрузки, что способствовало интенсивному достижению ДП №1 высоких технико-экономических показателей, а также эффективному освоению технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива [7]. Разработаны рациональные режимы работы печи, обеспечивающие среднесуточное производство чугуна около 5500 т/сут с вдуванием пылеугольного топлива до 150 кг/т чугуна и более.

ПАО «Енакиевский металлургический завод» [8]:

- выполнено технологическое сопровождение задувки ДП №3 после ее реконструкции с установкой бесконусного загрузочного устройства фирмы «Paul Wurth». Проведены предпусковые исследования распределения шихтовых материалов в печи, выполнена технологическая настройка оборудования системы загрузки, разработаны и реализованы рациональные программы загрузки ДП №3. Разработаны и реализованы рекомендации по совершенствованию систем контроля работы печи, программное обеспечение для поддержки принятия решений по выбору и корректировке режимов загрузки, рекомендации по формированию порций шихтовых материалов и по управлению окружным распределением шихты на ДП №3. Выполнены оценка эффективности грохочения, фактического уровня и резервов пропускной способности системы загрузки ДП №3. Определены предельно допустимые тепловые нагрузки на холодильники и остаточная толщина футеровки горна и лещади ДП №3 и ДП №5.

Разработка рациональных режимов загрузки шихтовых материалов в ДП №3, реализация рекомендаций по совершенствованию работы ДП №3 и ДП №5 в изменяющихся шихтовых условиях, обоснование и выбор рационального шлакового режима способствовали уменьшению расхода кокса на 3,5 кг/т чугуна.

ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»:

- реализованы разработанные в ходе исследований рациональные программы загрузки шихты ДП №7, что способствовало увеличению фактического производства чугуна на ~ 1700 т/сутки (до 10700 т/сутки), уменьшению среднемесячного расхода кокса на ~ 27 кг/т чугуна (до 409 кг/т чугуна), уменьшению на ~ 16 кг/т чугуна (до 488 кг/т чугуна) расхода суммарного топлива;

- применение разработанного рационального режима загрузки на ДП №6 позволило увеличить степень использования печных газов на 0,1-0,4% и уменьшить удельный расход кокса на выплавку чугуна на 3,1-3,9 кг/т [9]; выполнены комплексные исследования особенностей газораспределения в верхней части шахты ДП №6 ОАО «НЛМК», результаты которых позволили оценить степень влияния различных факторов на результаты контроля распределения газов в печи [10].

ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» [11]:

- на основании результатов предпусковых исследований разработаны рациональные программы загрузки ДП №2, которые обеспечили повышение эффективности и экономичности плавки - увеличение степени использования восстановительной способности печных газов на 0,6-1,6%, уменьшение удельного расхода топлива на 1,8 кг/т чугуна при заданном объеме производства чугуна;

- для ДП №№ 4, 6, 9, 10, оборудованных БЗУ, разработаны, рекомендованы и опробованы рациональные режимы загрузки.

ОАО «Северсталь»:

- разработаны современные технологические приемы повышения стабильности и эффективности плавки с формированием и загрузкой многокомпонентных смешанных порций, включающих основные компоненты шихты, кокс различного качества, отсеваемые фракции шихтовых материалов и добавки различного назначения [12];

- выполнена разработка и промышленное опробование параметров режима загрузки, обеспечивающих улучшение условий гарнисажеобразования и повышение эффективности промывок. Внедрение предложенных рекомендаций обеспечило уменьшение удельного расхода кокса на 1 кг/т чугуна.

Разработанные новые и усовершенствованные существующие способы, системы и отдельные устройства контроля и управления доменной плавкой, математические модели, описывающие процессы подготовки шихтовых материалов к доменной плавке, их загрузки и распределения на колошнике, формирования поверхности засыпи, структуры столба шихты в целом и его вязкопластичной зоны положены в основу новой интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой, разработка которой в настоящее время осуществляется в рамках целевого проекта.

1. *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. – Днепропетровск: Пороги, 2013. – 364 с.
2. *Технологическое обоснование эффективности загрузки многокомпонентных смешанных порций шихтовых материалов в доменную печь.* / В.И.Большаков, Н.Г.Иванча, И.Г.Муравьева, В.И.Вишняков.] – // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб.научн.тр.ИЧМ. – 2012. – Вып.25. – С.103–122.
3. *Экспериментальная оценка возможности использования электрических потенциалов, регистрируемых между фурмами и кожухом доменной печи, для анализа процессов в горне.* / В.И.Большаков, С.И.Семькин, И.Г.Муравьева и др.// Металлург. – 2013. – № 11 – С.29 – 35.
4. *Технологическое обоснование рациональных приемов задувки доменных печей большого и среднего объемов* / В.И.Большаков, Н.М.Можаренко,

- Г.Н.Голубых, В.Н.Логинов. // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб.научн.тр.ИЧМ. – 2009. – Вып.20. – С.3–10.
5. *Разработка и реализация в составе АСУ ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» автоматизированных способов контроля, прогноза и управления плавкой* / В.И.Большаков, И.Г.Муравьева, Д.Н.Тогобицкая и др. // Целевая комплексная программ НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин». Сборник научных статей по результатам, полученным в 2010–2012 гг., Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, Киев, 2012. – С.381 – 385.
 6. *Выбор экономичных режимов доменной плавки при помощи информационно-моделирующей системы* /И.Г.Товаровский, В.И.Большаков, В.П.Лялюк и др. // Сталь. – 2009. – № 11. – С.8–13.
 7. *Освоение работы доменной печи объемом 3000 м³ с применением пылеугольного топлива* / В.И.Большаков, А.Л.Чайка, В.В.Лебедь, Т.Г.Шевченко, Р.В.Авдеев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – № 4. – С. 36–40.
 8. *Большаков В.И., Семенов Ю.С., Кузнецов А.М.* Опыт освоения современной доменной печи, оборудованной БЗУ, в условиях изменяющегося качества шихтовых материалов. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 2. – С.82–86.
 9. *Совершенствование* распределения шихты на доменной печи №6 ОАО НЛМК / В.И.Большаков, А.Н.Арзамасцев, В.В.Лебедь, А.А.Жеребецкий // Сталь. – 2013. – № 1. – С.2-5.
 10. *Большаков В.И., Лебедь, В.В.Жеребецкий А.А.* Исследование влияния распределения шихты на радиальное распределение газового потока в верхней части доменной печи. // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. науч. тр. ИЧМ – 2011 – №23. – С.88-97.
 11. *Большаков В.И., Лебедь В.В., Жеребецкий А.А.* Совершенствование управления окружным распределением шихты на доменной печи, оснащенной БЗУ. // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб.научн.тр.ИЧМ. – 2010. – Вып. 22. – С.18–26.
 12. *Современные технологические приемы повышения стабильности и эффективности плавки, применяемые на доменной печи №5 ОАО «Северсталь».* / В.И.Большаков, А.С.Нестеров, Н.Г.Иванча и др. // Тр. VI Междунар. конгресса по агло-коксо-доменному производству. – Май, 2013. – Украина, Ялта. – С.72–91.

*Статья рекомендована к печати
канд.техн.наук Н.М.Можаренко*

В.І.Большаков, І.Г.Муравйова, М.Г.Іванча

Удосконалення способів контролю і управління доменною плавкою

Представлено результати фундаментальних досліджень, виконаних групою машин доменного виробництва відділу технологічного обладнання та систем управління протягом останніх п'яти років (2009 - 2013 рр.). Удосконалено і розроблено способи, пристрої та математичні моделі для управління доменної плавкою і завантаження шихтових матеріалів. Наведені приклади реалізації результатів досліджень на металургійних підприємствах.

Ключові слова: доменна плавка, пристрої, шихтові матеріали, математичні моделі, управління

V.I.Bolshakov, I.G.Muravyova, N.G.Ivancha

Improving ways to control and manage the blast furnace

The results of basic research carried out a group of machines blast furnace production of process equipment and control systems for the past five years (2009 - 2013). Improved and developed methods, devices, and mathematical models to control blast furnace and loading of charge materials. The examples of the results of research in the steel mills.

Keywords: blast furnace unit, charge materials, mathematical models, management