ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol.27, 2019, № 7-9 (314-316), 83-93 https://doi.org/10.15407/steelcast2019.07.083

УДК 669.013:681.5.008.6.001.5

И.Г. Муравьева, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, e-mail: irinamuravyova@gmail.com

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (Днепр, Украина)

Комплексные исследования технологий, оборудования и систем автоматизации металлургического производства

Показаны основные этапы формирования тематики исследований отдела технологического оборудования и систем управления. Выполнен анализ результатов научной деятельности трех подразделений отдела. Представлены основные разработки группы машин доменного производства, к числу которых можно отнести: технологию загрузки многокомпонентной шихты; комплексную математическую модель формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер бесконусного загрузочного устройства (БЗУ), выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи; интеллектуальную систему поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой; новые способы контроля и управления доменной плавкой с использованием информации современных систем автоматизированного контроля. Показаны основные направления сотрудничества с металлургическими предприятиями отрасли. Представлены основные направления исследований группы разработки технологий и оборудования для подготовки шихтовых материалов, охватывающие теоретические и экспериментальные исследования влияния физико-механических и технологических характеристик мелкофракционных шихтовых материалов на процесс прессования, качество брикетов и их металлургические свойства, а также создания технических решений механического оборудования для брикетирования. Представлены результаты исследований и разработки новых способов диагностирования, совершенствования режимов работы станов совместно с особенностями технологий, методов оценки стабильности работы оборудования и технологического процесса, которые выполняют сотрудники группы динамики прокатного оборудования.

Ключевые слова: *способы контроля и управления доменной плавкой, технология загрузки, многокомпонентная шихта, комплексная модель распределения шихты на колошнике, технологии и оборудование для брикетирования, динамика прокатного оборудования.*

В 1954 г. распоряжением Президиума АН УССР в Институте черной металлургии (ИЧМ) был создан отдел механизации и автоматизации металлургического производства, впоследствии – отдел технологического оборудования и систем управления (ОТОСУ) [1]. Возглавил его член-корреспондент НАН Украины Сергей Николаевич Кожевников – ученый-механик с мировым уровнем признания, создавший известную школу основ динамики металлургических машин. В течение многих лет деятельности отдела учениками Сергея Николаевича под его непосредственным руководством, а затем под руководством его преемников, руководителей отдела, д.т.н., профессоров А.В. Праздникова и О.Н. Кукушкина, академика НАН Украины В.И. Большакова выполнялись научные исследования динамических процессов в линиях приводов металлургического оборудования, прокатных станов практически всех типов, начиная с обжимных, заготовочных и заканчивая станами для производства листа, труб, сортового проката и катанки. Отдел выполнял также работы в области автоматизации металлургического производства.

Ввод новых металлургических агрегатов значительно расширил рамки научной деятельности ОТОСУ. Завершение строительства крупнейшей в мире доменной печи объемом 5000 м^3 на меткомбинате «Криворожсталь» в 1974 г. обусловило активное участие сотрудников отдела в освоении этой печи, в процессе которого сформировалось новое научное направление – создание теоретических основ разработки и совершенствования технологии, оборудования и автоматизации комплексов систем загрузки доменных печей большого объема [1, 2].

Еще одно новое направление научных исследований отдела возникло в 80-х годах прошлого столетия на основе результатов цикла ранее выполненных под руководством академика НАН Украины З.И. Некрасова работ по разработке и освоению технологии производства вюститных брикетов для доменных печей. Впоследствии это направление возглавил д.т.н. Носков В.А. Таким образом, последовательно была сформирована научная направленность исследований отдела технологического оборудования и систем управления.

На протяжении более чем четырех десятков лет, под руководством академика НАН Украины Вадима Ивановича Большакова разработаны и реализованы новые способы и приемы контроля и управления процессом доменной плавки, выбора рациональных технологических режимов и режимов работы оборудования, а также выполнены разработки, направленные на повышение интеллектуального потенциала и совершенствование алгоритмов функционирования автоматизированных систем управления технологическим процессом [2]. Особенностью выполненных исследований всегда являлась комплексность решения задач разработки и совершенствования технологии во взаимосвязи с работой оборудования и систем автоматизированного контроля и управления.

Традиционные направления работы отдела, такие как разработка технологических заданий (ТЗ) на проектирование систем загрузки при строительстве и реконструкции доменных печей (ДП), а также технологических требований к системам управления загрузкой с учетом сырьевых условий и особенностей технологии плавки [2]; технологическое сопровождение задувки и раздувки доменных печей, включающее расчет задувочной шихты и разработку программы ее загрузки, контроль загрузки задувочной шихты, проведение предпусковых исследований, технологическую наладку оборудования системы загрузки для обеспечения реализации заданных режимов ее работы, корректировку шлакового и дутьевого режимов, а также режима загрузки в период раздувки [3] в последние годы дополнились разработкой и совершенствованием технологии загрузки многокомпонентной шихты. Решение задач, связанных с рациональным использованием топливных, железосодержащих, флюсующих, гарнисажеобразующих и промывочных добавок, особенно актуально в настоящее время.

В течение последних 10 лет ОТОСУ совместно с отделом металлургии чугуна разработана технология загрузки многокомпонентной шихты, основные положения которой сформулированы с.н.с. Н.Г. Иванчой [4]. Составляющими этой технологии являются научно обоснованные и реализующие технологические требования приемы формирования и загрузки: железорудных смешанных порций; коксовых смешанных порций при использовании различных видов кокса в шихте; смешанных порций, содержащих добавки различного назначения; многокомпонентных смешанных порций, состоящих из железорудных материалов и кокса. Положения технологии, касающиеся формирования и загрузки железорудных смешанных порций, включают рациональные структуры этих порций и метод расчетного определения параметров их формирования, в том числе массы головной части из агломерата, обеспечивающей минимизацию содержания окатышей в пристеночной зоне, что способствует уменьшению агрессивного воздействия первичных шлаковых расплавов на огнеупорную футеровку шахты, а также препятствует износу холодильников и прогару воздушных фурм. Для загрузки доменных печей при использовании в шихте двух и более видов кокса разработаны новые технологические приемы и параметры формирования коксовых смешанных порций, обеспечивающие стабилизацию процесса плавки за счет распределения кокса пониженного качества в промежуточной зоне колошника с максимальной его концентрацией в области фурменного очага. В части формирования и загрузки смешанных порций, включающих добавки различного назначения, разработанная технология предусматривает выбор требуемого характера распределения конкретного вида добавок в соответствии с разработанными технологическими требованиями, расчетную оценку распределения добавок в текущих условиях и выбор рациональных параметров формирования смешанных порций, в состав которых включен данный вид добавок, с определением величины управляющего воздействия, влияющего на характер распределения.

Разработанная технология содержит также рекомендуемую структуру многокомпонентных смешанных порций, состоящих из агломерата, окатышей и кокса, рациональные диапазоны параметров формирования порций этого вида и периодичность их загрузки в составе цикла, обеспечивающие стабильное использование преимуществ смешивания железорудных материалов с коксом перед загрузкой в доменную печь, проявляющихся в уменьшении удельного расхода кокса и возможности использования увеличенного количества шихтовых материалов пониженного качества без существенного ухудшения показателей плавки.

Разработанная технология загрузки многокомпонентной шихты реализована на многих доменных печах Украины и стран бывшего СССР.

Основным инструментарием при разработке технологии загрузки доменных печей многокомпонентной шихтой явилась не имеющая мировых аналогов созданная сотрудниками отдела комплексная математическая модель формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи [4] (основные разработчики – с.н.с. Иванча Н.Г., н.с. Вишняков В.И., к.т.н., с.н.с. Шумельчик Е.И.). Модель обеспечивает определение текущего компонентного состава потока, формирующегося при выгрузке многокомпонентных порций из бункера БЗУ, и полного состава смесей компонентов шихты в различных кольцевых зонах колошника. Математическое и алгоритмическое обеспечение модели разработано на основе установленных фундаментальных зависимостей истечения шихтовых материалов из бункеров, а также результатов многочисленных экспериментальных исследований, выполненных ИЧМ на объектах доменного производства в промышленных условиях.

В модели учтено влияние комплекса процессов перемещения массивов шихтовых материалов и смешивания компонентов в процессе движения многокомпонентных порций шихты, начиная со стадии выгрузки их на доменный конвейер или загрузки в скипы до выгрузки в колошниковом пространстве, на формирование характеристик распределения

компонентов шихты на поверхности засыпи. Расчетный состав смеси компонентов шихты в заданной зоне колошника является исходной информацией для получения прогнозной оценки свойств образующихся расплавов (содержание FeO, вязкость и др.). Сопоставление прогнозных свойств расплавов с характеристиками, заданными технологическими требованиями, позволяет выполнить оценку эффективности применяемых режимов загрузки и шлакового режима и обоснованно принимать оперативные управляющие решения по корректировке их параметров.

Фрагмент интерфейса комплексной математической модели формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи показан на рис. 1.

Одним из направлений научной деятельности отдела является разработка систем управления. Сотрудниками отдела – к.т.н., с.н.с. Семеновым Ю.С., к.т.н. Шумельчиком Е.И., с.н.с. Иванчой Н.Г., м.н.с. Белошапкой Е.А. – совместно с коллегами из отдела физико-химических проблем металлургических процессов (зав. отделом, д.т.н., проф. Тогобицкая Д.Н.) под руководством автора статьи разработана интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой, сочетающая методы, базирующиеся на знаниях специалистов-экспертов и накопленном опыте, с предложенными методами математической оценки процессов на основе целевых критериев и алгоритмами их использования при поиске и формулировании решений по управлению процессом [5]. В комплексных критериях объединены технологические параметры и выходные данные систем автоматизированного контроля процессов, что в значительной степени облегчит принятие операторами решений по управлению доменной плавкой. Диагностика процесса плавки осуществляется на основе расчета следующих критериев оценки: теплового состояния доменной плавки, газодинамического режима, формы и положения пластичной зоны, эффективности осевой коксовой отдушины, воздействия расплавов на футеровку металлоприемника и интегрального показателя доменной шихты.

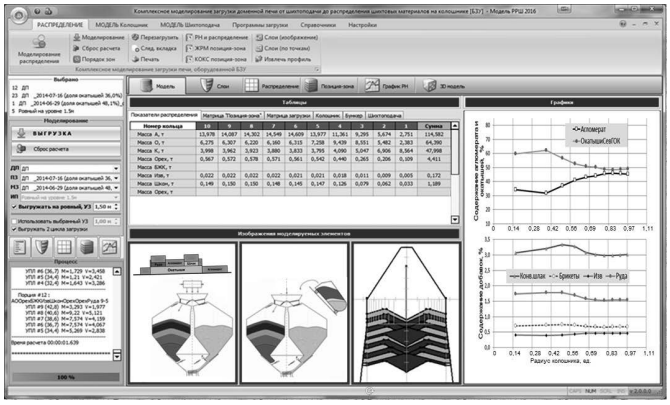


Рис. 1. Фрагмент интерфейса комплексной математической модели формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи

Фрагмент интерфейса интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой показан на рис. 2.

В настоящее время сотрудниками отдела разрабатывается экспертная система выбора оптимального состава многокомпонентной доменной шихты. Известные методы решения задачи выбора состава шихты, как правило, основываются на прогнозном определении показателей плавки при варьировании компонентного состава шихтовых материалов с использованием расчетов материально-тепловых балансов процесса плавки. Важной особенностью разрабатываемой системы является повышение точности решения оптимизационной задачи выбора состава многокомпонентной шихты путем ввода дополнительных технологических ограничений, обусловленных специфическими свойствами расплавов отдельных компонентов шихты и их смесей.

Известные и используемые в настоящее время методы оптимизации состава доменной шихты не учитывают неравномерность распределения ее компонентного состава и, соответственно, особенности процессов нагрева и восстановления шихтовых материалов, и специфику свойств расплавов, образующихся в различных зонах рабочего пространства доменной печи, что существенно снижает достоверность балансовых и оптимизационных расчетов. Кроме этого, особенности распределения компонентов шихты в объеме доменной печи налагают ряд технологических ограничений по использованию конкретных видов материалов в составе шихты, которые обусловлены специфическими свойствами расплавов этих материалов – их агрессивностью по отношению к футеровке или повышенной вязкостью.

Начиная с 2001 г. в отделе под руководством автора статьи выполняются исследования, направленные на разработку новых способов контроля и управления доменной плавкой с использованием информации современных систем автоматизированного контроля (отв. исп., к.т.н., с.н.с. Семенов Ю.С.). В результате этих исследований выполнен цикл работ, позволивший разработать технологические требования к установке систем измерения профиля поверхности засыпи для доменных печей средних и больших объ-

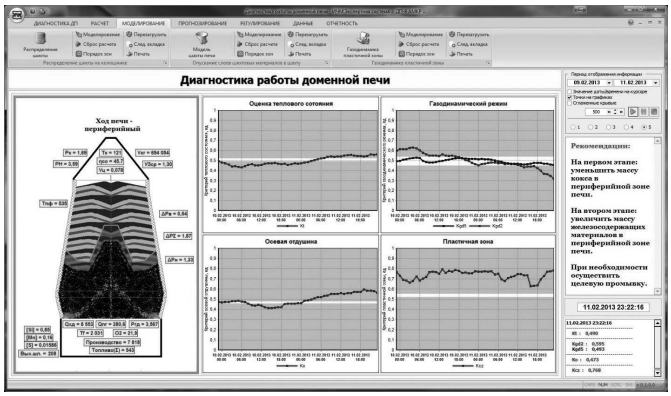


Рис. 2. Фрагмент интерфейса интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой

емов, оборудованных конусными и бесконусными загрузочными устройствами, а также методы расчета параметров поверхности засыпи шихты. С использованием информации первой отечественной радиолокационной системы разработаны способы контроля, прогноза и управления доменной плавкой, реализованные на крупнейшей в Украине ДП № 9 Криворожстали. Результаты исследований, выполненных в этом направлении, явились базой для дальнейшей разработки новых технологических способов управления доменной плавкой на основе информации, получаемой современными средствами контроля [6].

К числу успешных разработок последних лет можно отнести экспертный модуль системы контроля температур газового потока (системы термозондов) над поверхностью шихты в доменной печи, выходной информацией которого являются рекомендации по корректировке программ загрузки шихты (к.т.н., с.н.с. Семенов Ю.С. и к.т.н. Шумельчик Е.И.) [7, 8]. По результатам комплекса исследований, выполненных на доменных печах Енакиевского металлургического завода (ЕМЗ) с использованием стационарных термозондов, контролирующих распределение температур газового потока над поверхностью засыпи шихты, установлено, что в условиях постоянного распределения шихтовых материалов по радиусу при переменном содержании в шихте окатышей (20–70 %) и, соответственно, горячего агломерата, характер распределения температур газа по радиусу печи остается практически одинаковым, пропорционально изменяются только абсолютные значения температур при соответствующем изменении в шихте количества горячего агломерата (рис. 3) [7, 9]. Это свидетельствует о том, что информация, получаемая при помощи термозондов, может использоваться для принятия обоснованных управляющих воздействий независимо от соотношения в шихте компонентов, имеющих различную температуру [9].

Для двух доменных печей ЕМЗ, оборудованных конусным (КЗУ) (ДП № 5) и бесконусным (ДП № 3) загрузочными устройствами, предложены четыре температурных показателя оценки распределения газового потока по радиусу печи, характеризующие развитие периферийного, центрального распределения газового потока, газопроницаемость промежуточной зоны и величину осевой коксовой отдушины. Установлены оптимальные диапазоны изменения этих показателей при работе доменных печей в различных газодинамических и топливных условиях, в том числе, при вдувании пылеугольного топлива (ПУТ) до 130 кг/т чугуна. Экспертный модуль системы контроля температур газового потока (системы термозондов) над поверхностью шихты в доменной печи, генерирующий корректирующие воздействия режима загрузки при выходе показателей распределения температур за оптимальный диапазон их изменения, впервые разработан для указанных доменных печей и прошел опытно-промышленное опробование на этих объектах (рис. 4) [7, 8].

Для исследований, выполняемых ОТОСУ, всегда было характерно тесное сотрудничество с металлургическими предприятиями. Эта практика сохранена и сегодня. В течение шести лет (в период с 2011 по 2016 г.) специалисты отдела тесно сотрудничали с Енакиевским металлургическим заводом (руководитель к.т.н., с.н.с. Семенов Ю.С., отв. исп., к.т.н. Шумельчик Е.И.). За этот период специалистами ОТОСУ совместно с ОМЧ (отдел металлургии чугуна: зав. ОМЧ, к.т.н. Нестеров А.С., н.с. Горупаха В.В.) был выполнен комплекс научно-исследовательских работ, в рамках которых были получены как новые научные результаты, так и практические, получившие последующее эффективное применение в производстве.

Перед задувкой ДП № 3 полезным объемом 1719 м^3 после ее реконструкции в октябре 2011 г. были выполнены исследования параметров потоков шихтовых материалов, загружаемых в печь с помощью лоткового однотрактного бесконусного загрузочного устройства фирмы “Paul Wurth”, распределе-

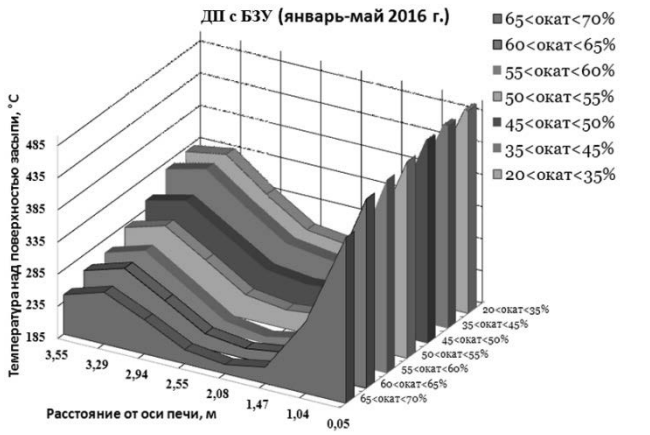


Рис. 3. Распределение температур газового потока над поверхностью засыпи ДП с БЗУ при различной доле в шихте окатышей

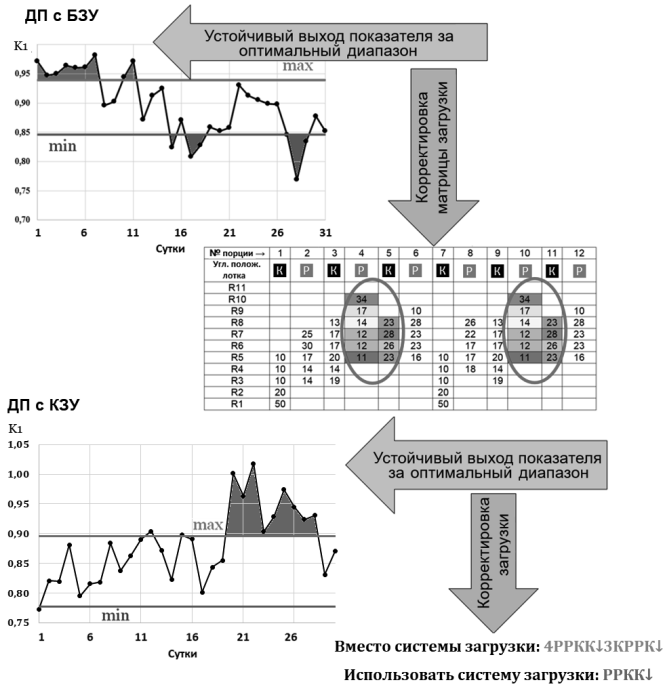


Рис. 4. Видеокадры экспертного модуля по управлению загрузкой ДП с БЗУ и с КЗУ

ния массы порций и их компонентов на колошнике, определены расходные характеристики шихтового затвора бункера БЗУ, а также выполнены исследования формирования профиля поверхности засыпки шихты, гранулометрического и компонентного составов слоя железосодержащих материалов по радиусу колошника [3].

Выполненный комплекс исследований позволил после задувки печи определить и реализовать режимы работы механизмов БЗУ, необходимые для эффективного применения рациональных программ загрузки печи [3, 7]. Помимо этого, для доменного цеха была разработана технологическая инструкция по эксплуатации БЗУ, которая устанавливает единый порядок эксплуатации и обслуживания оборудования БЗУ ДП № 3, а также порядок реализации технологических приемов управления ходом доменной плавки (н.с. Вишняков В.И.).

В 2013 г. при значительном ухудшении качества используемых шихтовых материалов разработан и реализован новый подход к выбору энергоэффективных режимов загрузки БЗУ, обеспечивающий стабильный экономичный ход доменной печи при использовании многокомпонентной шихты переменного качества в переходных дутьевых режимах и в условиях использования ПУТ. Подход заключается в уменьшении количества рабочих угловых положений лотка и смещении максимумов рудных нагрузок вдоль радиуса колошника от порции к порции, что способствует повышению газопроницаемости и увеличению степени использования восстановительной способности газов за счет увеличения времени пребывания газов в печи (рис. 5). Приведенный к сопоставимым условиям удельный расход кокса после изменения программы загрузки уменьшился на 2 % [7, 10].

Значительный комплекс исследований, выполненных на доменных печах ЕМЗ, был посвящен анализу динамики изменения температур футеровки заплечиков, распара и шахты ДП № 3 и температур тела холодильных плит по высоте ДП № 5 [7, 11]. Установлено, что на температуры футеровки верхней зоны в большей степени влияет степень ее износа, на температуры футеровки нижней зоны – формирование стабильного гарнисажа. Определены предельные значения среднемесячных температур, которые свидетельствуют о частичном или полном износе футеровки шахты, а также предельные значения температур нижней зоны печи, характеризующие наличие устойчивого гарнисажа [7, 11]. Температура футеровки шахты при практически полном ее износе была идентифицирована, как температура периферийного газового потока, и анализ ее изменения с определением экстремумов в нижней части шахты был выполнен при работе доменной печи в различных газодинамических и топливных условиях: без топливных добавок в дутье с дополнительным его увлажнением, с природным газом (ПГ), с ПГ и ПУТ, с ПУТ. Определение экстремумов кривой изменения температуры периферийного газового потока в нижней части доменной печи позволили обосновать принятые допущения о положении корня зоны вязкопластичного состояния [7].

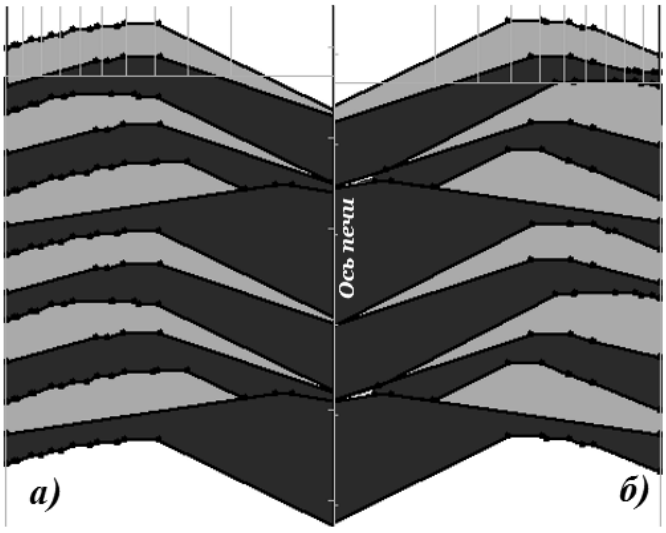


Рис. 5. Структура столба шихты при традиционном распределении шихтовых материалов (*а*) и при применении нового подхода (*б*)

Разработан и опробован метод выбора расположения закрытых воздушных фурм или фурм разного диаметра с использованием информации об изменении температур футеровки по высоте и окружности доменной печи. При использовании метода, в результате изменения положения закрытых фурм уменьшились как окружная неравномерность температур футеровки, так и средние значения температур, что обусловлено перераспределением газового потока, которое, кроме того, способствовало уменьшению удельного расхода кокса на 1,7 % [7].

Установлено, что изменения температуры тела холодильных плит ДП № 5 свидетельствуют об изменении направления движения газового потока в столбе шихты по радиусу и окружности печи при существенных отклонениях в процессе плавки и при изменении сопротивления столба шихтовых материалов. Увеличению местных тепловых нагрузок на систему охлаждения способствуют также повышение уровня тепло-газодинамических параметров дутья и интенсивности процесса плавки, увеличение рудной нагрузки при замене кокса ПУТ. Для уменьшения влияния этих факторов необходимо применять меры, направленные на развитие и поддержание центрального газового потока в печи, а также избегать резкого повышения теплоэнергетических параметров дутья. При условии удовлетворительной газо- и гидро- проницаемой способности коксовой насадки низа печи, за счет перераспределения газового потока в центральную зону печи, температуры холодильных плит уменьшаются до обычного рабочего уровня, расход ПУТ при этом должен быть ограничен качеством его сжигания в пределах окислительной зоны для предотвращения замусоренности промежуточных шлаков частицами ПУТ [7].

Освоение технологии вдувания ПУТ в доменном цехе ЕМЗ в 2016 г. в переменных шихтовых

условиях и с работой на коксе пониженного качества при использовании разработанных ИЧМ рациональных режимов загрузки, формирования порций и выборе рационального шлакового режима позволили довести расход ПУТ, в среднем, до 130 кг/т чугуна. Оперативный контроль состояния футеровки шахт доменных печей по показаниям термопар футеровки, тела холодильников и тепловых нагрузок системы охлаждения позволил своевременно проводить гарнисажеобразующие мероприятия и корректировать распределение компонентов шихтовых материалов по радиусу и окружности печи. Реализация предложенных изменений программы загрузки и режима формирования порций позволила при работе ДП № 3 без футеровки на начальном этапе освоения ПУТ снизить температуры периферийного газового потока по всей высоте печи, в среднем, на 13 % и уменьшить окружную неравномерность температур на 11 %. Использование в технологии рациональных режимов загрузки при вдувании ПУТ позволило до шоткретирования обеспечить эксплуатационную стойкость системы охлаждения и безаварийную работу доменных печей [7].

Сотрудничество ИЧМ с Днепровским металлургическим комбинатом (ДМК) в области доменного производства началось с октября 2017 г. в период задувки трех доменных печей цеха после их длительного простоя, вызванного отсутствием сырья в результате утраты контроля над рядом предприятий горно-металлургического комплекса (ГМК) Донбасса (руководитель к.т.н., с.н.с. Семенов Ю.С., отв. исп., н.с. ОМЧ В.В. Горупаха и с.н.с., к.т.н. ОТОСУ Шумельчик Е.И.).

В условиях доменного цеха ДМК впервые в Украине разработан и внедрен комплекс мероприятий по обеспечению рационального распределения ПУТ по воздушным фурмам. Исследования значений теплосъемов и распределения расхода дутья позволили оценить окружное распределение теоретической температуры горения и для ее выравнивания реализовать направленную неравномерность расхода ПУТ. Эффективность опытно-промышленного внедрения направленной неравномерности расхода ПУТ по окружности доменной печи с целью создания равномерного окружного распределения теоретической температуры горения выразилась в снижении приведенного расхода кокса на 4,7 % в опытном периоде при уменьшении на 12 % колеблемости содержания кремния в чугуне на выпуске. Для эффективного контроля распределения дутья по воздушным фурмам доменной печи и последующего изменения распределения ПУТ по окружности печи с целью выравнивания или создания заданной неравномерности теоретической температуры горения рекомендовано внедрение системы автоматизированного контроля, которая включает установку на каждый фурменный прибор расходомера воды, поступающей на охлаждаемые элементы фланцев подвешенного (подвижного) колена фурменного прибора, термопары на участке сливного трубопровода после охлаждения и подсистемы визуализации информации изменения теплосъемов, расходов пылеугольного топлива, фактической и рекомендуемой теоретической температуры горения.

Для ДП № 9 ДМК, оборудованной конусным загрузочным устройством, установлены оптимальные диапазоны изменения температурных показателей оценки распределения газового потока по радиусу при вдувании ПУТ от 130 до 160 кг/т чугуна [7, 8]. Разработан и прошел опытно-промышленное опробование экспертный модуль системы термозондов (по аналогии с реализацией экспертного модуля на доменных печах ЕМЗ), генерирующий корректирующие воздействия режима загрузки.

На доменных печах ЕМЗ с 2013 г. и ДМК с 2019 г. отработана технология использования в составе доменной шихты марганецсодержащих материалов (брикетов и подготовленного концентрата), что при рациональном формировании подач в цикле загрузки позволило усилить промывочный эффект этих компонентов и способствовало поддержанию технологической устойчивости работы печей в условиях низкого и нестабильного качества шихтовых материалов и при вдувании большого количества ПУТ, а также расширило возможности применения технологических приемов и мероприятий для снижения расхода кокса, например, ввода в шихту отсеваемых фракций кокса в количестве 25–45 кг/т чугуна. Установлено, что с вводом в шихту марганца снижается колеблемость теплового состояния, выраженная в уменьшении среднеквадратичного отклонения кремния в чугуне, увеличивается производство чугуна на 4 %, уменьшается расход кокса на 1,5 %. При производстве передельного чугуна рациональным диапазоном содержания марганца в чугуне является 0,25–0,35 %.

Отдельно следует отметить, что в 2018 г. начато новое направление исследований ИЧМ – освоение технологии вдувания ПУТ во вращающиеся печи обжига извести. Под руководством к.т.н., с.н.с. Семенова Ю.С. совместно с н.с. ОМЧ Горупахой В.В. и с.н.с., к.т.н. ОТОСУ Шумельчиком Е.И. разработан и опробован в автоматизированных системах управления (АСУ) метод диагностики работоспособности механизмов установки вдувания ПУТ в конвертерном цехе ДМК, который позволяет формировать отчеты о работе механизмов в табличном виде и в виде циклограмм за заданный пользователем промежуток времени, на основании которых генерируются рекомендации по проведению соответствующих профилактических и ремонтных работ. По результатам выполненной диагностики работы установки вдувания ПУТ во вращающиеся печи ДМК разработаны рекомендации по корректировке параметров работы механизмов установки, которые позволили сократить расход топлива и улучшить качество извести.

Эффективность создания новых и совершенствования известных металлургических технологий значительно повышается при комплексном подходе к разработке новых технологий и оборудования. Этот подход присущ исследованиям, выполняемым специалистами группы разработки технологий и оборудования для подготовки шихтовых материалов

– старшими научными сотрудниками, кандидатами технических наук Баюлом К.В., Ващенко С.В. и Худяковым А.Ю. [12–17]. На основе теоретических и экспериментальных исследований влияния физико-механических и технологических характеристик мелкофракционных шихтовых материалов на процесс прессования, качество готовой продукции (брикетов) и их металлургические свойства выполняется разработка технологических режимов брикетирования. Полученные в ходе выполнения данных разработок результаты положены в основу создания экспертной системы выбора рациональных технологий по производству брикетов широкого спектра использования, разработка которой находится на завершающей стадии. Развивается направление моделирования процессов подготовки и прессования шихт, что позволит в дальнейшем на качественно новом уровне формулировать и решать задачи оптимизации технологий брикетирования металлургического сырья.

В условиях расширения спектра перерабатываемых брикетированием материалов и в связи с этим возросшей потребностью в оборудовании для их переработки, специалистами Института при творческом участии сотрудников экспериментально-производственного предприятия ИЧМ (ЭПП ИЧМ) разработан ряд современных конструкций валковых прессов, отличающихся между собой производительностью, развиваемым усилием прессования, а также способом прижима валков (рис. 6). В настоящее время ведутся теоретические и прикладные работы по совершенствованию конструкции и технических характеристик прессового оборудования.

Научное направление работ отдела, с которого он и начинал свою деятельность, – исследование динамических процессов в металлургических машинах. В этом направлении в настоящее время продолжают исследования с.н.с., д.т.н. Веренев В.В., к.т.н., с.н.с. Подобедов Н.И., н.с. Юнаков А.М. и н.с. Коренной В.В.

Начиная с конца прошлого столетия научные разработки ведутся на основе подходов и концепции, учитывающих:

– взгляд на непрерывные прокатные станы как единую и в то же время дискретную систему взаимодействующих машин и технологий;

– связь процессов в оборудовании, режимов работы и технологии с качеством готового проката;

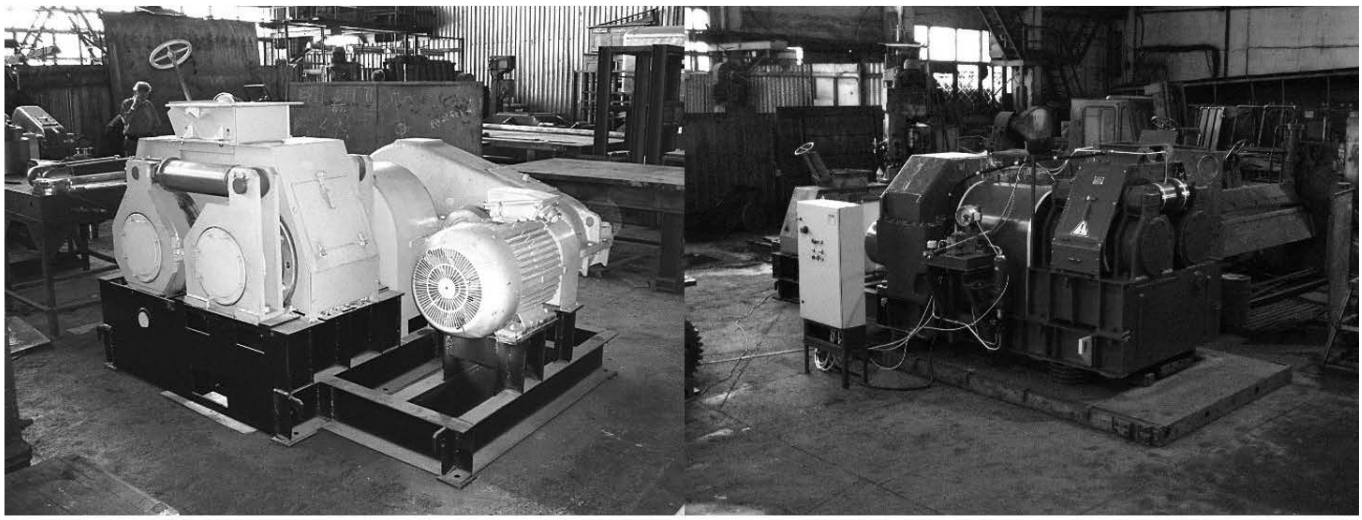
– анализ массовых измерений параметров динамики оборудования и технологии и установление скрытых статистических закономерностей, например, трех коэффициентов вариации механического момента;

– связь вибродинамических характеристик и ударных нагрузок с техническим состоянием (ТС) оборудования и рассеянием технологических параметров.

К числу наиболее значимых результатов исследований, выполненных сотрудниками этой группы, следует отнести следующие:

1. На основе установленных новых закономерностей и причинно-следственных связей в системе «Технология–Динамика–Техническое состояние (ТС) оборудования» впервые в мировой практике основано и развивается новое направление – диагностика ТС оборудования и стабильности технологии в переходных режимах работы, прежде всего при захвате металла валками. Разработаны и в промышленных условиях проверены два десятка новых не имеющих аналогов оригинальных способов и методов диагностирования, в частности, по новому признаку-времени запаздывания ударного импульса [18]. Благодаря этому существенно повышается эффективность распознавания критического состояния узлов, достоверность диагноза, отслеживания дрейфа и прогнозирования ТС. Появляются условия к переходу обслуживания по фактическому состоянию.

2. Разработан не имеющий аналогов метод определения и мониторинга ударных нагрузок при захвате металла валками. Метод основан на установленной



а *б*

Рис. 6 Валковые прессы конструкции ИЧМ: *а* – с механическим прижимом валков и усилием прессования до 1200 кН; *б* – с гидравлическим прижимом валков и усилием прессования до 2000 кН

расчетно-эмпирической статистической зависимости динамического момента ($Мд_{max}$) от статического ($М_{ст.}$). Разработана компьютерная программа статистического моделирования процесса захвата полосы с учетом ряда возмущений, позволяющая отслеживать тренд и прогнозировать $Мд_{max}$ с учетом изменения ТС оборудования; оптимизировать работу стана по динамическому критерию; оценивать возможности освоения новых энергосберегающих технологий, сортоpазмеров и режимов обжатий; накапливать данные для построения годовых упорядоченных нагрузочных диаграмм для расчета остаточного ресурса оборудования; своевременно определять клети с превышающим допустимым уровнем динамических нагрузок.

3. Раскрыты новые закономерности формирования динамики межклетевых натяжений и толщины полосы в процессе заполнения и освобождения полосой непрерывной 6-клетевой группы стана горячей прокатки, а также прокатки сварных соединений на холодных станах. Результаты получены путем компьютерного моделирования системы уравнений, записанных в абсолютных значениях переменных. С помощью программы, как инструмента сопровождения процесса прокатки, решается задача коррекции деформационно-скоростного режима при действии технологических возмущений – отклонение толщины и температуры раската, а со стороны оборудования – зазоры в линии привода [19].

4. Разработаны и в промышленных условиях станов 1680 и 1700 опробованы защищенные патентами новые способы формирования и прокатки слябов с фигурной передней кромкой. Достигнуто существенное в 1,5–2,5 раза уменьшение ударных нагрузок при захвате полосы валками, способствующее снижению поломок и увеличению долговечности оборудования [20].

Группа динамики прокатного оборудования продолжает работы по исследованию и разработке новых способов диагностирования, совершенствованию режимов работы станов совместно с особенностями технологий, методов оценки стабильности работы оборудования и технологического процесса и др. Опыт теоретических и экспериментальных исследований, обширная база измерений на действующих прокатных станах различного типа, разработанные методы и способы диагностики в переходных режимах, компьютерные программы статистического моделирования и мониторинга динамических нагрузок, взаимодействия непрерывной группы клетей через полосу и др. позволяют решать самые сложные и разнообразные задачи динамики и диагностики прокатных станов [21].

Результаты работы отдела за 65-летнюю историю – работающее в рациональных режимах оборудование систем загрузки доменных печей и сорто- и листопрокатные станы, валковые прессы для брикетирования мелкофракционных материалов; системы контроля и управления металлургическими процессами и т. п.

Планируемые нами научные исследования на ближайшие годы касаются перспективных, с нашей точки зрения, направлений, таких как:

– разработка новых методов управления доменной плавкой с использованием современных способов контроля процессов;

– усовершенствование технологии загрузки доменных печей многокомпонентной шихтой;

– разработка интеллектуальных систем управления доменной плавкой и экспертных систем выбора оптимального состава шихтовых материалов;

– развитие теоретических основ и усовершенствование технологии производства брикетов путем повышения эффективности технологических операций, использования новых видов связующих добавок;

– совершенствование конструкции валковых прессов, повышение их надежности, ремонто-пригодности и удобства в эксплуатации;

– на основе теоретических и промышленных исследований разработка технических решений как по созданию оборудования с минимальным уровнем динамики переходных процессов, так и разработка эффективных решений по режимным параметрам действующих станов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Большаков В.И.* Научные направления деятельности отдела технологического оборудования и систем управления. *Сб. науч. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2003. Вып. 6. С. 343–355.
2. *Большаков В.И.* Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. К.: Наукова думка, 2007. 412 с.
3. *Bolshakov V.I., Semenov Yu.S., Ivancha N.G., Vishnyakov V.I., Shumelchik E.I., Podkorytov A.L., Semion I.Yu., Kuznetsov A.M., Zubenko A.V. Study of the* Flow of Burden Materials and their Distribution on the Furnace Top of a Modern Blast Furnace. *Metallurgical and Mining Industry.* 2012. Vol. 4. № 3. P. 158–165.
4. *Ivancha N.G., Muravyova I.G., Shumel'chik E.I., Vishnyakov V.I.,.Semenov Yu.S.* Complex Mathematical Model of the Distribution of Multicomponent Charge in a Blast Furnace. *Metallurgist.* May 2018. Vol. 62. Iss. 1–2. P. 95–100.
5. *Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н., Семенов Ю.С., Иванча Н.Г., Белькова А.И., Шумельчик Е.И., Степаненко Д.А.* Создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой. Новые подходы. К.: Наукова думка, 2019. 272 с.
6. *Большаков В.И., Муравьева И.Г., Семенов Ю.С.* Применение радиолокационных систем измерения поверхности засыпи шихты для контроля и управления доменной плавкой. Днепропетровск: Пороги, 2013. 364 с.

7. *Семенов Ю.С., Шумельчик Є.І., Горупаха В.В.* Діагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах. Дніпро: Домінанта Прінт, 2018. 260 с.
8. *Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Horupakha V.V.* Expert Module of the Thermal Probe System for Blast Furnace Charging Control. *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48. No. 12. P. 802–806.
9. *Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Horupakha V.V.,* et al. Using Thermal Probes to Regulate the Batch Distribution in a Blast Furnace with Pulverized-Coal Injection. *Steel in Translation.* 2017. Vol. 47. No. 6. P. 389–393.
10. *Semenov Yu.S., Shumel'chik E.I., Gorupakha V.V.* Efficient Management of the Charging of Blast Furnaces and the Application of Contemporary Means of Control over the Variable Technological Conditions. *Metallurgist.* March 2018. Vol. 61. Iss. 11–12. P. 950–958.
11. *Semenov Yu.S., Shumel'chik E.I., Gorupakha V.V.* et al. Monitoring Blast Furnace Lining Condition during Five Years of Operation. *Metallurgist.* July 2017. Vol. 61. Iss. 3–4. P. 291–297.
12. *Vashchenko S.V., Khudyakov A.Yu., Baiul K.V., Semenov Yu.S.* Selecting the Batch Composition in Briquetting. *Steel in Translation*. Allerton Press, Inc. 2018. P. 509–512.
13. *Ващенко С.В., Худяков А.Ю., Баюл К.В., Семенов Ю.С.* Создание локальных моделей адгезионного сцепления частиц при брикетировании. *Сталь.* 2019. № 5. С. 4–8.
14. *Kieush L., Boyko M., Koveria A., Khudyakov A., Ruban A.* Utilization of the Prepyrolyzed Technical Hydrolysis Lignin as a Fuel for Iron Ore Sintering. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2019. № 1/6 (97). P. 34–39.
15. *Khudyakov A.Yu., Vashchenko S.V., Baiul K.V., Semenov Yu.S.* Kaolin Raw Material Briquetting for Lump Chamotte Production. *Refractories and Industrial Ceramics.* 2018. Vol. 59 (4). P. 333–337.
16. *Bayul K.V.* Effect of the geometrical parameters of roll press forming elements on the briquetting process: analytical study. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. July 2012. Vol. 51. Iss. 3–4. P. 157–164.
17. *Баюл К.В.* Синтез рациональной конструкции валкового пресса для производства композитного твердого топлива. *Проблемы региональной энергетики.* 2019. № 2(43). С. 103–116.
18. *Веренев В.В.* Снижение динамических нагрузок и диагностика широкополосных станов в переходных режимах. Никополь: СПД Фельдман О.О., 2014. 203 с.
19. *Веренев В.В., Путноки А.Ю., Подобедов Н.И.* Переходные процессы при непрерывной прокатке. Д.: Литограф, 2017. 116 с.
20. *Веренев В.В., Большаков В.И., Путноки А.Ю., Маншилин А.Г., Мацко С.В.* Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680. Днепропетровск: ИМА-пресс, 2011. 184 с.
21. *Веренев В.В.* Динамические процессы в полосовых станах холодной прокатки. Днепропетровск: Лира, 2015. 112 с.

Поступила 23.09.2019

REFERENCES

1. *Bolshakov, V.I.* (2003). Scientific activities of the department of technological equipment and control systems. *Sb. nauch. tr. IChM "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii". Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy, Collection of scientific works of the ISI,* iss. 6, pp. 343–355 [in Russian].
2. *Bolshakov, V.I.* (2007). High efficiency energy saving blast furnace technology. Kyiv: Naukova dumka, 412 p. [in Russian].
3. *Bolshakov V.I., Semenov Yu.S., Ivancha N.G., Vishnyakov V.I., Shumelchik E.I., Podkorytov A.L., Semion I.Yu., Kuznetsov A.M., Zubenko A.V.* (2012). Study of the Flow of Burden Materials and their Distribution on the Furnace Top of a Modern Blast Furnace. *Metallurgical and Mining Industry,* vol. 4, no. 3, pp. 158–165 [in English].
4. *Ivancha, N.G., Muravyova, I.G., Shumelchik, E.I. Vishnyakov, V.I., Semenov, Yu.S.* (2018). Complex Mathematical Model of the Distribution of Multicomponent Charge in a Blast Furnace. *Metallurgist,* vol. 62, iss. 1–2, pp. 95–100 [in English].
5. *Muravyova I.G., Togobitskaya D.N., Semenov Yu.S., Ivancha N.G., Belkova A.I., Shumelchik E.I., Stepanenko D.A.* (2019). Creating intelligent decision support systems for blast furnace management. New approaches. Kyiv: Naukova dumka, 272 p. [in Russian].
6. *Bolshakov, V.I., Muravyova, I.G., Semenov, Yu.S.* (2013). Application of radar systems for measuring the charge backfill surface for controlling and controlling blast furnace melting. Dnepropetrovsk: Porogi, 364 p. [in Russian].
7. *Semenov, Yu.S., Shumelchik, E.I., Gorupaha, V.V.* (2018). Diagnosis and management of blast furnace melting under variable fuel and raw materials conditions. Dnipro: Dominanta Print, 260 p. [in Ukrainian].
8. *Semenov, Yu.S., Shumelchik, E.I., Horupakha, V.V.* (2018). Expert Module of the Thermal Probe System for Blast Furnace Charging Control. *Steel in Translation,* vol. 48, no. 12, pp. 802–806 [in English].
9. *Semenov, Yu.S., Shumelchik, E.I., Horupakha, V.V.* et al. (2017). Using Thermal Probes to Regulate the Batch Distribution in a Blast Furnace with Pulverized-Coal Injection. *Steel in Translation,* vol. 47, no. 6, pp. 389–393 [in English].
10. *Semenov, Yu.S., Shumel'chik, E.I., Gorupakha, V.V.* (2018). Efficient Management of the Charging of Blast Furnaces and the Application of Contemporary Means of Control over the Variable Technological Conditions. *Metallurgist,* vol. 61, iss. 11–12, pp. 950–958 [in English].

11. *Semenov, Yu.S., Shumel'chik, E.I., Gorupakha, V.V.* et al. (2017). Monitoring Blast Furnace Lining Condition during Five Years of Operation. *Metallurgist*, vol. 61, iss. 3–4, pp. 291–297 [in English].
12. *Vashchenko, S.V., Khudyakov, A.Yu., Baiul, K.V., Semenov Yu.S.* (2018). Selecting the Batch Composition in Briquetting. *Steel in Translation.* Allerton Press, Inc., pp. 509–512 [in English].
13. *Vashhenko, S.V., Hudiakov, A.Ju., Baiul, K.V., Semenov, Yu.S.* (2019). Creation of local models of adhesion of particles during briquetting. *Stal',* no. 5, pp. 4–8 [in Russian].
14. *Kieush, L., Boyko, M., Koveria, A., Khudyakov, A., Ruban A.* (2019). Utilization of the Prepyrolyzed Technical Hydrolysis Lignin as a Fuel for Iron Ore Sintering. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* no. 1/6 (97), pp. 34–39 [in English].
15. *Khudyakov, A.Yu., Vashchenko, S.V., Baiul, K.V., Semenov, Yu.S.* (2018). Kaolin Raw Material Briquetting for Lump Chamotte Production. *Refractories and Industrial Ceramics,* vol. 59 (4), pp. 333–337 [in English].
16. *Bayul, K.V.* (July 2012). Effect of the geometrical parameters of roll press forming elements on the briquetting process: analytical study. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics,* vol. 51, iss. 3–4, pp. 157–164 [in English].
17. *Bajul, K.V.* (2019). Synthesis of a rational design of a roll press for the production of composite solid fuel. *Problemy regionalnoi energetiki. Problems of regional energy,* no. 2 (43), pp. 103–116 [in Russian].
18. *Verenev, V.V.* (2014). Dynamic load reduction and diagnostics of broadband mills in transient conditions. Nikopol: SPD Feldman O.O., 203 p. [in Russian].
19. *Verenev, V.V., Putnoki, A.Yu., Podobedov, N.I.* (2017). Continuous rolling transients. D.: Litograf, 116 p. [in Russian].
20. *Verenev, V.V., Bolshakov, V.I., Putnoki, A.Yu., Manshilin, A.G., Matsko, S.V.* (2011). Dynamic processes in the stands of broadband mill 1680. Dnepropetrovsk: IMA-press, 184 p. [in Russian].
21. *Verenev, V.V.* (2015). Dynamic processes in cold rolling strip mills. Dnepropetrovsk: Lira, 112 p. [in Russian].

Received 23.09.2019

Анотація

І.Г. Муравйова, д-р техн. наук, ст. науч. співр., зав. відділу,
e-mail: irinamuravyova@gmail.com

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Комплексні дослідження технологій, обладнання та систем автоматизації металургійного виробництва

Показано основні етапи формування тематики досліджень відділу технологічного обладнання та систем управління. Виконано аналіз результатів наукової діяльності трьох підрозділів відділу. Представлено основні розробки групи машин доменного виробництва, до числа яких можна віднести: технологію завантаження багатокомпонентної шихти; комплексну математичну модель формування багатокомпонентних порцій шихтових матеріалів, їх завантаження в бункер безконусного завантажувального пристрою (БЗП), вивантаження з бункера і розподілу на поверхні засипу; інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень з управління доменною плавкою; нові способи контролю і управління доменною плавкою з використанням інформації сучасних систем автоматизованого контролю. Показано основні напрямки співпраці з металургійними підприємствами галузі. Представлено основні напрями досліджень групи розробки технологій і обладнання для підготовки шихтових матеріалів, що охоплюють теоретичні і експериментальні дослідження впливу фізико-механічних і технологічних характеристик дрібнофракційних шихтових матеріалів на процес пресування, якість брикетів і їх металургійні властивості, а також створення технічних рішень механічного обладнання для брикетування. Представлено результати досліджень і розробки нових способів діагностування, вдосконалення режимів роботи станів спільно з особливостями технологій, методів оцінки стабільності роботи обладнання і технологічного процесу, які виконують співробітники групи динаміки прокатного обладнання.

Ключові слова

Способи контролю і управління доменною плавкою, технологія завантаження, багатокомпонентна шихта, комплексна модель розподілу шихти на колошникові, технології та обладнання для брикетування, динаміка прокатного обладнання.

Summary

I.G. Muravyova, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Head of the Department, e-mail: irinamuravyova@gmail.com

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Integrated research of technologies, equipment and automation systems of metallurgical production

The main stages of the formation of research topics of the department of technological equipment and control systems are shown. The analysis of the results of scientific activities of the three divisions of the department has been made. The main developments of a group of blast furnace machines are presented, which include: technology for loading a multicomponent charge; a complex mathematical model of the formation of multicomponent batches of charge materials, their loading into the bunker of the bell-less top (BLT), unloading from the bunker and distribution on the surface of the mound; intelligent decision support system for blast furnace management; new methods of control and management of blast furnace using information from modern automated control systems. The main directions of cooperation with metallurgical enterprises of the industry are shown. The main directions of research by a group of developing technologies and equipment for the preparation of charge materials are presented, covering theoretical and experimental studies of the influence of physic-mechanical and technological characteristics of finely charged charge materials on the pressing process, the quality of briquettes and their metallurgical properties, as well as the creation of technical solutions for mechanical equipment for briquetting. The results of research and development of new methods for diagnosing, improving the operating conditions of mills are presented together with the features of technologies, methods for assessing the stability of equipment and the technological process, which are performed by employees of the rolling equipment dynamics group.

Keywords

Methods of control and management of blast furnace smelting, loading technology, multicomponent charge, a comprehensive model of the distribution of the charge on the top, technologies and equipment for briquetting, the dynamics of rolling equipment.