

А.И. Белькова, И.Г. Муравьева, А.С. Скачко

МЕТОДЫ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ДОМЕННОЙ ШИХТЫ

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины

Целью работы является решение задачи выбора оптимального состава железорудных материалов для загрузки доменной печи. Проведен аналитический обзор существующих подходов к оценке качества и методов выбора рационального состава железорудных материалов, реализованных в составе системы управления отечественных и зарубежных доменных печей в современных условиях. Предложена методика моделирования процессов направленного образования расплавов, разработанная в Институте черной металлургии. Описание процессов превращений железорудных материалов в доменной печи и свойств жидких продуктов плавки проведено с использованием параметров межатомного взаимодействия в расплавах. Методика использует комплекс интегральных критериев и физико-химических моделей, которые позволяют оценивать шихтовые, газодинамические и температурные условия плавления. Аналитически описано влияние качества железорудного сырья на свойства первичных расплавов и конечных продуктов доменной плавки. Разработан интегральный показатель качества шихты и интегральный индикатор режима температурного дутья. Основным отличием предложенного подхода к выбору состава шихты от аналогичных разработок, ориентированных на традиционный критерий «основность конечного шлака», является использование комплекса физико-химических критериев, характеризующих качество и свойства железной руды, первичного и конечного доменного шлака. Использование разработанных прогностических моделей и критериев в составе автоматизированных систем управления доменной печью позволяет прогнозировать химический состав железа и шлака. Стабилизация свойств шлака в заданных пределах обеспечивает выплавку чугуна требуемого состава и снижение расхода кокса в современных нестабильных условиях выплавки чугуна.

Ключевые слова: доменная плавка, железорудные материалы, чугун, доменный шлак, интегральный критерий, прогнозная модель

Состояние проблемы. Актуальность задачи выбора оптимального состава шихты в современных условиях обусловлена значительным расширением сырьевой базы и компонентного состава шихтовых материалов, загружаемых в доменную печь. Помимо основных традиционных шихтовых материалов (агломерата, окатышей и кокса), в состав доменной шихты вовлечены вторичные ресурсы, в частности, загружаемые в виде брикетов целевого назначения и отсеваемые фракции железосодержащих компонентов и кокса.

Существенное различие высокотемпературных свойств загружаемых железорудных материалов обуславливает необходимость разработки современных средств их прогнозирования и оптимизации состава доменной шихты для улучшения технико-экономических показателей доменной плавки и обеспечения качества чугуна.

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»,
Сборник научных трудов ИЧМ. – 2018. - Вып.32*

Известные методы решения задачи выбора состава шихты, как правило, основываются на прогнозном определении показателей доменной плавки при варьировании компонентного состава шихтовых материалов с использованием расчетов материально – тепловых балансов процесса. В качестве целевых функций, чаще всего, задаются следующие показатели: выплавка чугуна заданного состава, обеспечение заданных свойств конечного шлака, обеспечение максимальной производительности доменной печи, минимизация расхода кокса или (и) себестоимости чугуна. Также известные методы оптимизации состава доменной шихты не учитывают неравномерность распределения ее компонентного состава в рабочем объеме доменной печи и связанные с этим особенности процессов нагрева, восстановления и плавления шихтовых материалов в различных ее зонах. Соответственно, не учитывается специфика свойств расплавов, образующихся в различных зонах рабочего пространства доменной печи, что существенно снижает достоверность балансовых и оптимизационных расчетов. Кроме этого, особенности распределения шихтовых материалов в объеме доменной печи налагают ряд технологических ограничений по использованию конкретных компонентов в составе шихты, которые обусловлены специфическими свойствами расплавов этих материалов – их агрессивностью по отношению к футеровке или повышенной вязкостью.

В этой связи, особо актуальными являются задачи, решение которых направлено на создание комплекса математических моделей, интегрирование которых в единую экспертную систему позволит решать задачи выбора оптимального состава доменной шихты в условиях расширения ее компонентного состава и изменения металлургических свойств.

Целью работы является аналитический обзор известных методов выбора оптимального состава доменной шихты, реализованных в составе АСУТП отечественных и зарубежных доменных печей, с целью обоснованного использования и развития собственного подхода к оптимизации состава шихты на основе комплекса физико-химических моделей и интегральных критериев, обеспечивающих направленное формирование продуктов доменной плавки в нестабильных шихтовых и технологических условиях выплавки чугуна.

Основной материал исследования. В условиях металлургического предприятия выбор или корректировка доменной шихты осуществляется мастером печи в соответствии с технологической инструкцией, исходя из заданной основности шлака при постоянных коэффициентах распределения кремния и железа. Такой подход, не учитывающий влияние параметров дутья, часто приводит к нарушениям теплового и шлакового режима и выплавке чугуна с существенным колебанием химического состава, в частности, по содержанию в нем серы и кремния.

Модель расчета шихты и параметров доменной плавки, разработанная Д.В. Гулыгой [1], базируется на материальном и тепловом балансах плавки и учитывает влияние параметров процесса на потери тепла, степень косвенного восстановления и переход элементов в чугун. Однако, прогнозные возможности модели в части оценки показателей выплавленного чугуна из загруженных железорудных материалов ограничены. При расчете состава чугуна, в частности, содержания кремния, используется найденная Чипманом [1] зависимость его от основности доменного шлака, которая является входным параметром, а не прогнозируется. Коэффициенты распределения серы и марганца определяются с использованием их зависимостей от содержания кремния в чугуне.

Данный подход к расчету состава продуктов плавки, основанный на заданном значении основности шлака и температуры чугуна, не учитывает изменения показателей загружаемой шихты и дутьевого режима и может приводить к несоответствию фактических и расчетных показателей плавки, а также к их термодинамической несогласованности.

В составе современных АСУТП отечественных и зарубежных доменных печей реализован широкий комплекс информационно-моделирующих (экспертных) систем для контроля, анализа и принятия технологических решений, в том числе, для решения задач выбора рационального состава шихты при изменении поставок железорудного сырья и свойств кокса [1-6]. Основным назначением существующих подсистем для расчета шихты является расчетный поиск такого состава рудной части, который с учетом показателей качества и стоимости железорудных материалов и добавок обеспечивает минимальную себестоимость выплавляемого чугуна и при этом удовлетворяет всем ограничениям, касающимся технологических параметров и ресурсов управления.

Как показал анализ результатов ранее выполненных исследований и разработок, задача выбора оптимального состава доменной шихты актуальна не только для условий работы металлургических предприятий Украины, но и зарубежья. Так, необходимость использования шихтовых материалов пониженного качества компанией «Voestalpine Stahl» (в связи с высокими транспортными затратами из-за географического расположения Линца) обусловила разработку экспертной системы «Vaigon TNG» [7]. Одной из основных технологических моделей системы является модель расчета шихты. Модель определяет требуемый состав шихты в зависимости от результатов химического анализа железорудных материалов и целевых значений расхода восстановителя и основности шлака. Расчет производится перед каждым изменением состава шихты. Модель массового и теплового баланса выполняет расчет баланса масс и тепла для определенного периода времени. Результаты позволяют сделать

заключение о состоянии печи. Модель верификации баланса определяет ошибку расчета на основании сравнения измеренных и рассчитанных значений и их последующего анализа. Данная модель позволяет расширить функциональные возможности предыдущей модели. Модель индикаторов эффективности рассчитывает различные индексы, например, Thermal Quality Index (TQ), которые будут использоваться на следующей стадии для прогнозирования будущих состояний печи.

В странах ближнего зарубежья наиболее известной и проработанной является автоматизированная система анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха, разработанная в Уральском федеральном университете и функционирующая на ОАО «ММК» [3-6]. В системе реализован комплекс расчетных программных модулей, включая подсистему оптимального выбора состава шихты, которая позволяет с использованием методов нелинейного программирования решать стратегические задачи при изменении поставок железорудного сырья и топлива.

При решении данной задачи используются модели сквозного расчета агломерационной и доменной шихты, технико-экономических показателей плавки при изменении дутьевых параметров и свойств железорудных материалов и кокса, расчета свойств шлака и моделирования газодинамического режима. В качестве целевых функций при оптимизации состава шихты используются традиционные критерии: минимальный расход кокса и максимальная производительность, минимальное содержание серы в чугуне и вязкость доменного шлака и их свертка. При этом учитывается ряд ограничений в отношении теплового, шлакового, газодинамического режимов плавки и качество чугуна. Следует учесть, что решение оптимизационной задачи выбора состава шихты имеет определенные технологические ограничения при оптимизации, направленные на обеспечение нормального теплового состояния печи, рациональных газодинамического и шлакового режимов и требуемого распределения свойств образующихся расплавов в рабочем пространстве доменной печи.

Многофакторность доменного процесса и сложность учета этих факторов в процессе расчета шихты и решения задачи оптимизации ее состава предопределяют необходимость разработки различных способов свертки комплексов параметров для обеспечения полноценного учета их влияния, с одной стороны, и возможности практической реализации расчетов, – с другой.

Одним из важных требований при определении состава шихты является постоянство содержания в ней железа на определенном уровне: снижение его приводит к разогреву печи, а повышение - к похолоданию, что вызывает необходимость вести процесс с резервом тепла, то есть, с перерасходом кокса. Изменение содержания кремнезема и основных

оксидов в шихте приводит к изменению состава шлака и его физических свойств и расстройству процесса. Спонтанные изменения гранулометрического состава агломерата, во многом определяющего газопроницаемость столба шихты, могут вызвать нарушения установившегося распределения крупности материала на колошнике и газового потока, снизить степень использования его восстановительной способности, и, в конечном итоге, ухудшить показатели доменного процесса.

Наряду с показателями содержания железа, кремнезема, оксидов кальция, магния и алюминия при оценке металлургической ценности сырья и выборе состава шихты необходим также учет содержания других компонентов: марганца, серы, титана, меди, фосфора, натрия и калия, мышьяка, свинца и цинка. В ряде случаев используют отдельные соотношения компонентов – модули: кальциевый (основность) $M_{Ca} = CaO/SiO_2$; магнетитовый $M_{Fe} = FeO/Fe_{общ}$; глиноземный $M_{Al} = Al_2O_3/SiO_2$; магниезиальные $M_{MgO} = MgO/SiO_2$ [8] и MgO/FeO ; горячей прочности $M_{гп} = 1,43(Fe_{общ} - 2,33 \cdot FeO)$, микроструктуры $M_{М} = 1,29 \cdot \frac{Fe_{общ}}{FeO} \cdot \frac{CaO}{SiO_2}$ [9]; отношения: $Fe_{общ}/SiO_2$, $MgO/Fe_{общ}$ и др.

На Новолипецком металлургическом комбинате разработан способ производства агломерата с высокой основностью (в пределах 2,0 – 5,0) и прочностью [10], при этом используется соотношение, где содержание окислов элементов, имеющих сродство к кислороду больше (числитель) и меньше (знаменатель), чем у кремния: $\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{MnO + SiO_2 + FeO + Fe_2O_3}$.

Технологически необходимая основность агломерата и его прочность, позволяющая достигать высоких эксплуатационных характеристик в доменном и конвертерном переделах, обеспечивается при изменении отношения в пределах от 0,20 до 0,46.

Кроме характеристик химического состава железорудных материалов, к важнейшим показателям качества относят их прочность, восстановимость и температурный интервал вязкопластичного состояния, определяемый температурами начала плавления и расплавления материалов. По данным немецких и японских исследователей, на 60-70% газодинамическое сопротивление столба шихтовых материалов в доменной печи определяется высокотемпературными свойствами железосодержащих компонентов шихты и их смесей, связанными с условиями образования вязкопластичной зоны, положение и размеры которой определяются температурными интервалами их плавления [11].

Таким образом, для описания поведения железорудных материалов в процессе их восстановительно-тепловой обработки необходимо учитывать химический состав компонентов шихты, а также наиболее значимые показатели металлургических свойств агломератов и окатышей,

определяющих образование жидких фаз, влияющих на формирование конечных продуктов плавки и способствующих повышению ее эффективности.

В связи с этим, при решении задач оптимизации состава шихты и качества чугуна целесообразно использовать интегральный показатель шихты, который позволит расчетным путем прогнозировать показатели формирующихся расплавов из различных железорудных материалов и на их основе получить требуемые свойства жидких фаз, а также оптимизировать их физико-химическое состояние с обеспечением выплавки чугуна заданного качества с минимальными энергозатратами.

В Институте стали и сплавов на основе анализа данных о качестве агломерата (окатышей) разработаны и предложены в качестве базовых для сертификации железорудного доменного агломерата следующие обобщающие показатели [12]:

- интегральный показатель химического состава агломерата $I_{ха}$:

$$I_{ха} = 1.276 \cdot x_1^{1,032} \cdot x_2^{-0,019} \cdot x_3^{0,105} \cdot x_4^{0,098}, \quad (1)$$

где x_1 , x_2 , x_3 – массовая доля $Fe_{об}$, FeO , SiO_2 , %; x_4 – основность агломерата CaO/SiO_2 ;

- интегральный показатель металлургических свойств агломерата $I_{ма}$:

$$I_{ма} = 3,002 \cdot f_1^{0,923} \cdot f_2^{0,014} \cdot f_3^{-0,055}, \quad (2)$$

где f_1 , f_2 – горячая прочность агломерата на удар и истирание по ГОСТ 19575-84, %; f_3 - восстановимость по ГОСТ 19575-84, %.

В Институте черной металлургии для определения металлургической ценности доменного железорудного сырья (агломерата, окатышей или их смеси), разработан комплексный показатель качества [13]: $ПК = \sum_{i=1}^9 F_i \cdot V_i$,

где F_i и V_i – соответственно, составляющие комплексного показателя качества и соответствующие им условные баллы, определяющиеся исходя из прогнозного расхода кокса на 1 т чугуна. Составляющие F_i и V_i учитывают влияние содержания железа в сырье, основности, прочности, истираемости во вращающемся барабане и в процессе восстановления, отношения степени восстановления при испытании по методу определения газопроницаемости и усадки слоя при восстановлении к степени восстановления при испытании по методу определения прочности в процессе восстановления, а также свойств первичного расплава: температуры начала фильтрации расплава, количества непрофильровавшегося расплава и содержания закиси железа в первичном шлаке при нагреве на слое кокса до 1600°C.

Для оценки качества железорудных материалов в ИЧМ разработан также критерий $K_R^{ж.м.}$, позволяющий прогнозировать параметры плавки [14]:

$$K_R^{ж.м.} = \frac{Fe_{общ}}{\Sigma O} \cdot \frac{R^{1050}/R^{800}}{FeO_{пш}} \cdot \frac{T_{к.т.}}{T_{п.ф.}} \cdot \frac{1}{\rho/tg\alpha} \cdot B_{+5} \cdot \quad (3)$$

В структуре представленного показателя учтены как показатель химического состава доменной шихты $Fe_{06}/\Sigma O$, так и показатели металлургических свойств, обуславливающих нормальное протекание процессов доменной плавки при рациональном распределении материалов по сечению печи: восстановимость при различных температурах R_{1050}/R_{800} , прочность B_{+5} , а также показатели первичного расплава – содержание $FeO_{пш}$ и отношение температур капельного течения и начала отделения жидких фаз на коксовой насадке от рудных материалов $T_{кт}/T_{нф}$. Также показатель $K^{ж.м.}$ учитывает структурное состояние оксидной системы шихты, представленное отношением интегральных физико-химических параметров $\rho/tg\alpha$, где ρ – показатель стехиометрии системы, $tg\alpha$ определяет степень окисленности системы [14]. Данные параметры определяются с помощью разработанной в ИЧМ физико-химической модели структуры оксидной системы и могут быть рассчитаны для любой многокомпонентной шлаковой системы. В результате выполненных исследований [15] была установлена тесная связь интегральных параметров шлаковой связки железорудных материалов ρ и Δe (химический эквивалент системы) с комплексом металлургических свойств сырья и формируемых из них шлаковых расплавов: прочностью, восстановимостью, температурами размягчения и плавления, вязкостью и т.д. Данное обстоятельство особенно важно для описания и оперативной оценки поведения материалов в печи, поскольку, к сожалению, на отечественных предприятиях постоянно контролируется только химический состав и некоторые прочностные характеристики в отличие от зарубежных предприятий, где полный контроль качества продукции, по соответствующим стандартам ИСО, проводят постоянно.

Информационной основой разработки и адаптации прогнозных моделей к современным условиям служат результаты экспериментальных исследований, накопленных в базах данных «Железорудные материалы» и «Шлак», а также немногочисленные сведения, представленные в современных публикациях о составе и свойствах агломерата, окатышей и их смесей с различными добавками.

Результаты ранее выполненных исследований влияния качества железорудного сырья на технико-экономические показатели доменной плавки широко освещены в источниках [16-21]. В конкретных сырьевых

условиях авторами устанавливается количественная оценка влияния отдельных показателей сырья (основности агломерата, прочности, щелочных соединений и т.д.) на производительность, расход кокса, степень использования газа и прямого восстановления. При этом анализируются влияние свойств сырья на формирование и размеры вязкопластичной зоны, свойства первичного расплава. Вместе с тем, оценка влияния шихтовых условий на показатели конечных продуктов плавки рассматривается на качественном уровне без соответствующих количественных зависимостей.

Рассмотренные выше комплексные показатели шихты учитывают показатели химического состава и некоторые металлургические свойства агломерата и окатышей. При этом, отсутствует учет показателей, характеризующих процессы агрегатных и фазовых превращений железорудных материалов и формирование конечных расплавов в условиях доменной плавки. Реализация этих процессов в значительной степени предопределяется минералогическим составом шихтовых материалов и образующихся из них расплавов. Опыт изучения минералогии конечных доменных шлаков показал, что свойства шлаковых расплавов, в частности, температура ликвидус и вязкость, являются следствием не только состава и термодинамических условий, но и его определенной структуры, которую отражает минералогический состав. В результате выполненных исследований наследственных связей компонентов пустой породы шихты с минералогическим составом доменных шлаков разработан интегральный показатель качества доменной шихты, включающий сочетание соотношений оксидов шихты и параметров первичных расплавов, характеризующих агрегатные превращения и восстановление материалов в печи [22]:

$$K_{III} = \left(\frac{Fe_{об}}{SiO_2}\right)^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{CaO}{SiO_2}\right)^{\alpha_2} \cdot \left(\frac{Al_2O_3}{SiO_2}\right)^{\alpha_3} \cdot \left(\frac{MgO}{SiO_2}\right)^{\alpha_4} \cdot \left(\frac{R_2O}{CaO}\right)^{\alpha_5} \cdot \left(\frac{T_{кт}}{T_{нф}}\right)^{\alpha_6} \cdot \left(\frac{FeO_{пш}}{-\Delta e/\rho}\right)^{\alpha_7},$$

где $Fe_{об}/SiO_2$ – показатель богатства шихты; CaO/SiO_2 – основность шихты; MgO/SiO_2 , Al_2O_3/SiO_2 , R_2O/CaO – магнезиальный, глиноземный и щелочной модули шихты; $T_{нф}$, $T_{кт}$ – температуры фильтрации через коксовую насадку и капельного течения первичного шлакового расплава, °C; $FeO_{пш}$ – содержание FeO в первичном шлаковом расплаве, мас. %; Δe – химический эквивалент шлакообразующей части шихты; ρ – показатель стехиометрии шлакообразующей части шихты. Показатели степеней α_0 , α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 , α_6 , α_7 характеризуют значимость частного показателя доменной шихты, их определяют по результатам работы доменной печи в установившихся шихтовых и технологических условиях.

Интегральный показатель шихты $K_{\text{ш}}$ обладает более высокой информативностью по сравнению с ранее используемыми показателями, поскольку комплекс учитываемых соотношений оксидов шихты характеризует фазовые (агрегатные) превращения сырья в печи, горячую прочность, восстановимость и высокотемпературные свойства шихты, и, как следствие, направленное распределение элементов шихты в системе «чугун-шлак». Знание $K_{\text{ш}}$ позволяет судить, как об уровне качества железорудного сырья и доменной шихты, так и об их влиянии на качество выплавляемого чугуна, поскольку:

- во-первых, высокая степень связи показателя $K_{\text{ш}}$ с коэффициентами распределения элементов шихты (серы, марганца, кремния, титана) (рис. 1) обосновывает его использование в качестве модельного параметра для прогнозирования состава продуктов плавки в различных сырьевых условиях с использованием прогнозных моделей коэффициентов распределения шихты между чугуном и шлаком в виде $L_{\text{э}} = f(K_{\text{ш}})$ по схеме «Шихта» + «Технология» = «Продукты плавки»;

- во-вторых, установленная связь интегрального показателя доменной шихты $K_{\text{ш}}$ с традиционно используемыми для оценки эффективности доменного процесса показателями (содержанием серы в чугуне, степенью использования газа, степенью прямого восстановления железа) для конкретных условий доменной печи позволяет определить оптимальные интервалы его изменения, обеспечивающие выплавку кондиционного чугуна при минимальном расходе кокса (рис.2) [23].

Разработанный интегральный показатель шихты целесообразно использовать как критерий ее плавкости с целью направленного формирования расплавов требуемых свойств в задачах оптимизации состава многокомпонентной доменной шихты за счет стабилизации свойств железорудного сырья и образующихся из них первичных расплавов.

В Институте черной металлургии НАНУ для решения задач оптимизации состава доменной шихты и качества чугуна разработана концепция моделирования процессов направленного формирования расплавов [23, 24], базирующаяся на следующих основных положениях:

- описание процессов агрегатных и фазовых превращений материалов в доменной печи и формирования жидких продуктов плавки осуществляется с учетом минералогического состава через соотношения показателей железорудных материалов и шлаковых расплавов;

- состав и свойства чугуна и доменных шлаков прогнозируются с использованием физико-химических моделей и интегральных критериев, позволяющих взаимосвязано оценивать показатели качества шихты и свойства продуктов доменной плавки;

- выбор оптимального состава доменной шихты осуществляется на основе оптимизации шлакового режима по комплексу свойств конечного

шлака, обеспечивающих его высокую серопоглотительную способность и получение чугуна требуемого состава с минимальными энергетическими и сырьевыми затратами.

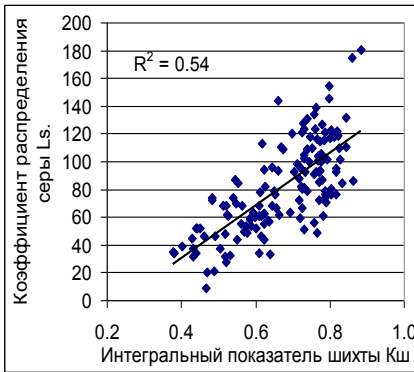


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком от интегрального показателя шихты $K_{ш}$ для условий работы ДП №9 ПАО АМКР

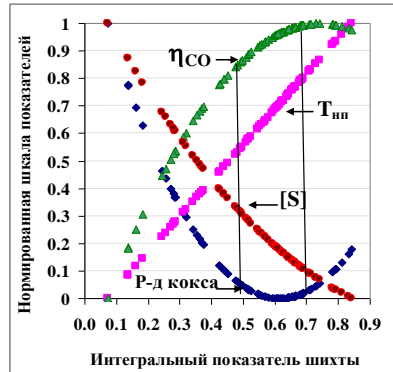


Рисунок 2 – Связь показателя шихты $K_{ш}$ с содержанием серы в чугуне, степенью использования газа, расходом кокса и температурой начала плавления шихты для конкретных условий работы ДП

Указанная концепция реализована в виде комплекса физико-химических критериев и моделей, включающих, в частности:

модель металлического расплава для расчета интегрального параметра – химического эквивалента состава чугуна Z^Y ;

модель шлакового расплава для расчёта интегральных параметров шлакового расплава: химического эквивалента состава шлака Δe и показателя стехиометрии шлака ρ (аналог основности);

прогнозные модели для расчета комплекса свойств первичных и конечных шлаков в виде Свойство = $f(Z^Y, \Delta e, \rho)$: вязкости (η , Па·с) и поверхностного натяжения (σ , мН/м) при заданной температуре, теплосодержания (энтальпии) при температуре хорошей текучести, соответствующей вязкости 0,3 Па·с (ΔH , кДж/кг), серопоглотительной способности, температур начала кристаллизации (ликвидус, T_l , °С) и конца кристаллизации (солидус, T_c , °С), степени отклонения системы «металл-шлак» от равновесия;

прогнозные модели для расчета коэффициентов межфазного распределения элементов (серы, кремния, марганца, железа) в виде уравнений: $L_{\Sigma} = A_{\Sigma} \cdot (P/K)^{\beta_1} \cdot K_{ш}^{\beta_2} \cdot K_{т}^{\beta_3}$, где P/K – рудная нагрузка; $K_{ш}$ – комплексный показатель шихты; $K_{т}$ – комплексный показатель технологического режима плавки.

Основным отличием данного подхода к выбору состава шихты от аналогичных разработок, ориентируемых на традиционный критерий основности конечного шлака, является использование комплекса физико-химических критериев, характеризующих качество и свойства, как железорудного сырья, так и первичного и конечного доменного шлака, стабилизация свойств которого в заданных пределах обеспечивает выплавку чугуна требуемого состава и снижение расхода кокса. Оптимальный состав шлака определяется численными значениями Δe и ρ , обеспечивающими вязкость в пределах 0,3 Па·с и температуру кристаллизации 1300°C (рис.3).

В этом случае величина серопоглотительной способности стремится к максимуму, а величина энтальпии и поверхностного натяжения – к минимуму, что обеспечивает хорошую десульфурацию чугуна и снижение расхода кокса. Кроме того, осуществляется контроль степени приближения системы «металл – шлак» к равновесному состоянию по сере по отношению $\varepsilon = L_{S_{\phi}} / L_S^0$, где $L_{S_{\phi}}$ и L_S^0 – фактическое и равновесное значения коэффициента распределения серы. При этом близость этой точки к линии равных значений $L_{S_{\phi}}$ и L_S^0 характеризует степень завершенности процесса десульфурации чугуна шлаком (достижения равновесия по сере).

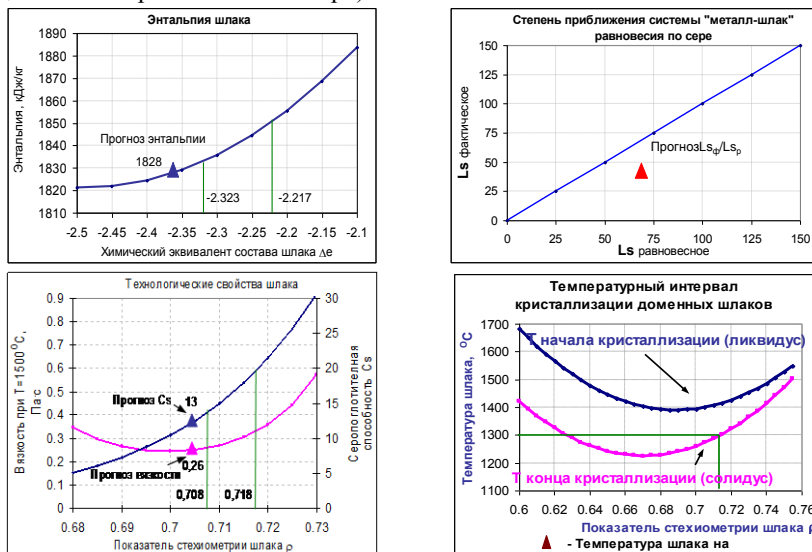


Рисунок 3. Выбор оптимального шлакового режима по комплексу свойств конечного шлака

Выводы. Выполнен аналитический обзор существующих подходов к оценке качества железорудных материалов и методов выбора рационального состава доменной шихты, реализованных в составе АСУТП отечественных и зарубежных доменных печей в современных условиях.

Для решения задачи выбора оптимального состава шихты обосновано использование развиваемой в Институте методики моделирования процессов направленного формирования расплавов, включающей комплекс физико-химических моделей и интегральных критериев, позволяющих взаимосвязано оценивать качество шихты, состав и свойства продуктов доменной плавки и решать задачи оптимизации качества чугуна в современных нестабильных условиях работы доменных печей.

Библиографический список

1. *Гулыга Д.В.* Модель расчета шихты, кокса и параметров доменной плавки / Д.В. Гулыга. // *Сталь*. – №9. – 2002. – С. 11-14.
2. *Тараканов А.К.* Использование математических моделей и диалоговых систем в управлении доменным процессом / А.К. Тараканов // *Бюллетень «ЧМ»*. – №11. – 2001. – С.30-33.
3. *Спирин Н.А.* Комплекс модельных систем поддержки принятия решений для управления технологией доменной плавки / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, А.А. Бурькин [и др.] // *Металлург*. – №9. – 2010. – С. 29-31.
4. *Дмитриев А.Н.* Использование современных информационных технологий для анализа и контроля доменного процесса / А.Н. Дмитриев, Н.А. Спирин // *Бюллетень «ЧМ»* – №1. – 2014. – С. 21-25.
5. *Шипанов К.А.* Технологические особенности и программное обеспечение расчета задувочной шихты доменной печи / К.А. Шипанов, Н.А. Спирин, А.А. Бурькин [и др.] // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. – №2. – Т.2. – 2015. –С. 134-138.
6. *Спирин Н.А.* Использование современных информационных технологий для анализа доменного процесса / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболов [и др.] // *Металлург*. – №5. – 2016. – С. 13-19.
7. Экспертные системы – новый уровень оптимизации работы доменных печей / [Херл Й., Шалер М., Штоль К. и др.] – *Черные металлы*, 2007. – №9. – С. 37-43.
8. Пат. 2048548 Российская федерация. МПК С22В1/16. Способ производства офлюсованного железорудного агломерата / Лядова В.Я., Ходак Л.З.; заявитель: Институт металлургии им. А.А. Байкова РАН (Россия) – №5048431; заявл. 19.06.1992; опубл. 20.11.1995.
9. *Пузанов В.П.* Доменной плавке XXI века – технологию производства равновесного агломерата / В.П. Пузанов, В.А. Кобелев, В.С. Рудин // *Сталь*. – 2005. – № 6. – С. 51-54.

10. Пат. 2146296 Российская федерация. МПК C22B1/16. Высокоосновный агломерат: / Лисин В.С., Скороходов В.Н., Настич В.П., Кукарцев В.М., Мизин В.Г., Мамышев В.А., Захаров Д.В., Греков В.В., Зарапин А.Ю.; заявитель: ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (Россия) – № 99114698/02; заявл. 06.07.1999; опубл. 10.03.2000.
11. *Пузанов В.П.* Повышение качества железорудного сырья на металлургических предприятиях России / В.П. Пузанов, А.В. Малыгин, Б.М. Боранбаев // *Металлург.* – 1995. – № 10. – С. 18
12. *Жак А.Р.* Интегральный показатель качества технологии агломерационного процесса / А.Р. Жак, Ю.С. Юсфин, М.В. Русина // *Изв. ВУЗов. Черная металлургия.* – 1997. – № 11. – С. 10-15.
13. Пат. 2283877 Российская федерация. МПК C22B1/14. Способ определения металлургической ценности доменного железорудного сырья / Гуркин М.А., Гельгорн А.В., Нестеров А.С., Большаков В.И., Невраев В.П., Денисова С.Ю., Якушев В.С.; заявитель: ОАО «Северсталь» (Россия) – №2005124065/02; заявл. 28.07.2005; опубл. 28.07.2005.
14. *Большаков В.И.* Критерий качества железорудных материалов / В.И. Большаков, Н.А. Гладков // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2000. – № 1. – С. 5-9.
15. *Приходько Э.В.* База данных и модели для прогнозирования плавкости железорудных материалов / Э.В. Приходько, А.Ф. Хамхотько, Д.Н. Тогобицкая // *Сталь.* –1998. – №9. – С. 7-9.
16. *Ткач А.Я.* Особенности современных шихтовых условий в доменном цехе ОАО «ДМЗ им. Петровского». /А.Я. Ткач, А.В. Шепель, В.А. Петренко [и др.] // *Металл и литье Украины.* – 2003. – № 5. – С. 28-32.
17. *Большаков В.И.* Опытно-промышленная апробация технологии доменной плавки с повышенной долей окатышей / В.И. Большаков, В.И. Логинов, М.Ю. Суханов [и др.] // *Сталь.* – 2006. – № 1. – С. 6-11.
18. *Курунов И.Ф.* Влияние качества железорудного сырья и кокса на показатели работы доменных печей в условиях ОАО «НЛМК» / И.Ф. Курунов, В.Н. Титов, В.Л. Емельянов [и др.] // *Металлург.* – 2010. – №1. – С. 28-34.
19. *Товаровский И.Г.* Аналитическое исследование процессов и режимов доменной плавки при различной степени предварительной металлизации шихты / И.Г. Товаровский, А.Е. Меркулов // *Сталь.* – 2010. – № 11. – С.7–13.
20. *Лялюк В.П.* Влияние состава и качества железорудного сырья на технико-экономические показатели / В.П. Лялюк, В.А. Шеремет, А.К. Тараканов, [и др.] // *Бюллетень «Черная металлургия» ОАО «Черметинформация».* –2010. – №12. – С. 32-38.
21. *Шатоха В.И.* Проблемы выбора шлакового режима доменной плавки для металлургических предприятий Украины в современных условиях / В.И. Шатоха // *Теория и практика металлургии.* – 1997. – № 1. – С. 18-23.
22. *Тогобицкая Д. Н.* Генерация комплексного показателя доменной шихты с учетом ее минералогии для направленного формирования продуктов плавки / Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова, Д.А. Степаненко, А.С. Скачко // *Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия».* – 2015. – № 2. – С. 26–33.
23. *Тогобицкая Д.Н.* Выбор состава доменной шихты, обеспечивающего направленное формирование жидких продуктов доменной плавки /

Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова, Д.А. Степаненко [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Днепропетровск. – 2016. – № 3. – С. 11-18.

24. Концепция моделирования процессов направленного формирования расплавов доменной плавки / Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова, Д. А. Степаненко, Н.А. Циватая, А.С. Скачко // *Сб. трудов МК «Сучасна металургія: проблеми, завдання, рішення. Наука і виробництво*. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 134-141.

Reference

- Gulyga D.V. Model' rascheta shikhty, koxsa i parametrov domennoy plavki / D.V. Gulyga. // *Stal'*. – №9. – 2002. – S. 11-14.
- Tarakanov A.K. Ispol'zovaniye matematicheskikh modeley i dialogovykh sistem v upravlenii domennym protsessom / A.K. Tarakanov // *Byulleten' «CHM»*. – №11. – 2001. – S.30-33.
- Spirin N.A. Kompleks model'nykh sistem podderzhki prinyatiya resheniy dlya upravleniya tekhnologiyey domennoy plavki / N.A. Spirin, V.V. Lavrov, A.A. Burykin [i dr.] // *Metallurg*. – №9. – 2010. – S. 29-31.
- Dmitriyev A.N. Ispol'zovaniye sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy dlya analiza i kontrolya domennogo protsessa / A.N. Dmitriyev, N.A. Spirin // *Byulleten' «CHM»* – №1. – 2014. – S. 21-25.
- Shipanov K.A. Tekhnologicheskiye osobennosti i programmnoye obespecheniye rascheta zaduvochnoy shikhty domennoy pechi / K.A. Shipanov, N.A. Spirin, A.A. Burykin [i dr.] // *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*. – №2. – T.2. – 2015. – S. 134-138.
- Spirin N.A. Ispol'zovaniye sovremennykh informatsionnykh tekhnologiy dlya analiza domennogo protsessa / N.A. Spirin, V.V. Lavrov, V.YU. Ryboleyev [i dr.] // *Metallurg*. – №5. – 2016. – S. 13-19.
- Ekspertnyye sistemy – novyy uroven' optimizatsii raboty domennykh pechey / [Kherl Y., Shaler M., Shtol' K. i dr.] – *Chernyye metally*, 2007. – №9. – S. 37-43.
- Pat. 2048548 Rossiyskaya federatsiya. MPK S22V1/16. Sposob proizvodstva oflyusovannogo zhelezorudnogo aglomerata / Lyadova V.YA., Khodak L.Z.; zayavitel': Institut metallurgii im. A.A. Baykova RAN (Rossiya) – №5048431; zayavl. 19.06.1992; opubl. 20.11.1995.
- Puzanov V.P. Domennoy plavke XXI veka – tekhnologiyu proizvodstva ravnovesnogo aglomerata / V.P. Puzanov, V.A. Kobelev, V.S. Rudin // *Stal'*. – 2005. – № 6. – S. 51-54.
- Pat. 2146296 Rossiyskaya federatsiya. MPK S22V1/16. Vysokoosnovnyy aglomerat: / Lisin V.S., Skorokhodov V.N., Nastich V.P., Kukartsev V.M., Mizin V.G., Mamyshev V.A., Zakharov D.V., Grekov V.V., Zharapin A.YU.; zayavitel': OAO «Novolipetskiy metallurgicheskiy kombinat» (Rossiya) – № 99114698/02; zayavl. 06.07.1999; opubl. 10.03.2000.
- Puzanov V.P. Povysheniye kachestva zhelezorudnogo syr'ya na metallurgicheskikh predpriyatiyakh Rossii / V.P. Puzanov, A.V. Malygin, B.M. Boranbayev // *Metallurg*. – 1995. – № 10. – S. 18.

12. Zhak A.R. Integral'nyy pokazatel' kachestva tekhnologii aglomeratsionnogo protsessa / A.R. Zhak, YU.S. Yusfin, M.V. Rusina // Izv. VUZov. Chernaya Metallurgiya. – 1997. – № 11. – S. 10-15.
13. Pat. 2283877 Rossiyskaya federatsiya. MPK S22V1/14. Sposob opredeleniya metallurgicheskoy tsennosti domennogo zhelezorudnogo syr'ya / Gurkin M.A., Gel'gorn A.V., Nesterov A.S., Bol'shakov V.I., Nevrayev V.P., Denisova S.YU. , Yakushev V.S.; zayavitel': OAO «Severstal'» (Rossiya) – №2005124065/02; zayavl. 28.07.2005; opubl. 28.07.2005.
14. Bol'shakov V.I. Kriteriy kachestva zhelezorudnykh materialov / V.I. Bol'shakov, N.A. Gladkov // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2000. – № 1. – S. 5-9.
15. Prikhod'ko E.V. Baza dannykh i modeli dlya prognozirovaniya plavkosti zhelezorudnykh materialov / E.V. Prikhod'ko, A.F. Khamkhot'ko, D.N. Togobitskaya // Stal'. – 1998. – №9. – S. 7-9.
16. Tkach A.YA. Osobennosti sovremennykh shikhtovykh usloviy v domennom tsekhe OAO «DMZ im. Petrovskogo». /A.YA. Tkach, A.V. Shepel', V.A. Petrenko [i dr.] // Metall i lit'ye Ukrainy. – 2003. – № 5. – S. 28-32.
17. Bol'shakov V.I. Opytno-promyshlennaya aprobatsiya tekhnologii domennoy plavki s povyshennoy doley okatyshey / V.I. Bol'shakov, V.I. Loginov, M.YU. Sukhanov [i dr.] // Stal'. – 2006. – № 1. – S. 6-11.
18. Kurunov I.F. Vliyaniye kachestva zhelezorudnogo syr'ya i koksa na pokazateli raboty domennykh pechey v usloviyakh OAO «NLMK» / I.F. Kurunov, V.N. Titov, V.L. Yemel'yanov [i dr.] // Metallurg. – 2010. – №1. – S. 28-34.
19. Tovarovskiy I.G. Analiticheskoye issledovaniye protsessov i rezhimov domennoy plavki pri razlichnoy stepeni predvaritel'noy metallizatsii shikhty / I.G. Tovarovskiy, A.Ye. Merkulov // Stal'. – 2010. – № 11. – S.7–13.
20. Lyalyuk V.P. Vliyaniye sostava i kachestva zhelezorudnogo syr'ya na tekhniko-ekonomicheskoye pokazateli / V.P. Lyalyuk, V.A. Sheremet, A.K. Tarakanov, [i dr.] // Byulleten' «Chernaya metallurgiya» OAO «Chermetinformatsiya». – 2010. – №12. – S. 32-38.
21. Shatokha V.I. Problemy vybora shlakovogo rezhima domennoy plavki dlya metallurgicheskikh predpriyatiy Ukrainy v sovremennykh usloviyakh / V.I. Shatokha // Teoriya i praktika metallurgii. – 1997. – № 1. – S. 18-23.
22. Togobitskaya D. N. Generatsiya kompleksnogo pokazatelya domennoy shikhty s uchetom yeye mineralogii dlya napravlennogo formirovaniya produktov plavki / D.N. Togobitskaya, A.I. Bel'kova, D.A. Stepanenko, A.S. Skachko // Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii «Chernaya metallurgiya». – 2015. – № 2. – S. 26–33.
23. Togobitskaya D.N. Vybor sostava domennoy shikhty, obespechivayushchego napravlennoye formirovaniye zhidkikh produktov domennoy plavki / D.N. Togobitskaya, A.I. Bel'kova, D.A. Stepanenko [i dr.] // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – Dnepropetrovsk. – 2016. – № 3. – S. 11-18.
24. Kontseptsiya modelirovaniya protsessov napravlennogo formirovaniya rasplavov domennoy plavki / D.N. Togobitskaya, A.I. Bel'kova, D. A. Stepanenko, N.A. Tsvataya, A.S. Skachko // Sb. trudov MK «Suchasna metalurgiya: problemi, zavdannaya, rishennya. Nauka i virobnitstvo. – Dnipropetrovsk, 2015. – S. 134-141.

A.I.Белькова, I.G.Муравйова, O.C.Скачко

Методи вибору раціонального складу доменної шихти

Метою роботи є вирішення завдання вибору оптимального складу залізорудних матеріалів для завантаження доменної печі. Проведено аналітичний огляд існуючих підходів до оцінки якості та методів вибору раціонального складу залізорудних матеріалів, реалізованих у складі системи управління вітчизняних і зарубіжних доменних печей в сучасних умовах. Запропоновано методику моделювання процесів спрямованого освіти розплавів, розроблена в Інституті чорної металургії. Опис процесів перетворень залізорудних матеріалів в доменній печі і властивостей рідких продуктів плавки проведено з використанням параметрів міжатомної взаємодії в розплавах. Методика використовує комплекс інтегральних критеріїв і фізико-хімічних моделей, які дозволяють оцінювати шихтові, газодинамічні і температурні умови плавлення. Аналітично описано вплив якості залізорудної сировини на властивості первинних розплавів і кінцевих продуктів доменної плавки. Розроблено інтегральний показник якості шихти і інтегральний індикатор режиму температурного дугтя. Основною відмінністю запропонованого підходу до вибору складу шихти від аналогічних розробок, орієнтованих на традиційний критерій «основність кінцевого шлаку», є використання комплексу фізико-хімічних критеріїв, що характеризують якість і властивості залізної руди, первинного та кінцевого доменного шлаку. Використання розроблених прогностичних моделей і критеріїв в складі автоматизованих систем управління доменною піччю дозволяє прогнозувати хімічний склад заліза і шлаку. Стабілізація властивостей шлаку в заданих межах забезпечує виплавку чавуну необхідного складу і зниження витрати коксу в сучасних нестабільних умовах виплавки чавуну. **Ключові слова:** доменна плавка, залізорудні матеріали, чавун, доменний шлак, інтегральний критерій, прогнозна модель

A.I.Belkova, I.G.Muravyeva, A.S.Skachko

Methods for choosing a rational composition of the blast furnace charge

The aim of the work is to solve the problem of choosing the optimal composition of iron ore materials for blast furnace loading. An analytical review of the existing approaches to assessing the quality and methods for selecting a rational composition of iron ore materials implemented as part of the control system of domestic and foreign blast furnaces in modern conditions has been carried out. A method of modeling the processes of directional formation of melts, developed at the Iron and Steel Institute, is proposed. The description of the processes of transformation of iron ore materials in a blast furnace and the properties of liquid smelting products was carried out using the parameters of interatomic interaction in melts. The technique uses a set of integral criteria and physicochemical models that allow estimating charge, gas-dynamic and temperature melting conditions. The influence of the quality of iron ore on the properties of primary melts and final products of blast-smelting is analyzed. An integral indicator of the quality of the charge and an integral indicator of the temperature blast mode have been developed. The main difference of the proposed approach to the selection of the composition of the charge from similar developments focused on the traditional criterion «basicity of the final slag» is the use of a set of physico-chemical criteria that

characterize the quality and properties of iron ore, primary and final blast furnace slag. The use of the developed prognostic models and criteria as part of automated blast furnace control systems allows us to predict the chemical composition of iron and slag. Stabilization of slag properties within the specified limits ensures the smelting of cast iron of the required composition and a reduction in coke consumption in the current unstable conditions of smelting iron.

Keywords: blast furnace smelting, iron ore materials, cast iron, blast furnace slag, integral criterion, predictive model

*Статья поступила в редакцию сборника 31.10.2018 года,
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания
редакционной коллегии сборника №1 от 26 декабря 2018 года)*

Рецензенты: д.т.н., проф. Тогобицкая Д.Н.; д.т.н., проф. Л.В.Камкина