

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ



Выбор рационального состава доменного шлака на основе оптимизации его физико-химических свойств

Д. Н. ТОГОБИЦКАЯ, А. И. БЕЛЬКОВА, Ю. М. ЛИХАЧЕВ, Н. А. ЦИВАТАЯ, А. С. СКАЧКО

Украина, Институт черной металлургии НАН Украины

Изложены принципы и результаты решения обратной задачи выбора рационального состава доменного шлака на основе оптимизации его физико-химических свойств.

Викладені принципи та результати рішення зворотної задачі вибору раціонального складу доменного шлаку на основі оптимізації його фізико-хімічних властивостей.

Set out the principles and the results of solving the inverse problem of choosing the rational composition of blast furnace slag based on the optimization of its physical and chemical properties.

Состояние вопроса. В процессе доменной плавки шлак играет весьма важную роль при выплавке чугуна, соответствующего тем или иным требованиям. При одинаковых условиях работы доменной печи различным маркам выплавляемого чугуна соответствуют шлаки различного химического состава, следовательно, и различных свойств.

Между составом выплавляемого чугуна и образующимся при этом шлаком существует определенная тесная зависимость. Это объясняется, прежде всего, тем, что, не учитывая той части шихты, которая выносятся через колошник в виде газа и пыли, вся остальная ее часть почти полностью распределяется между чугуном и шлаком.

Процесс образования шлака зависит от множества факторов: химического состава и соотношения шихтовых материалов, распределения температуры по высоте доменной печи, газодинамического режима работы печи, очертания профиля печи и т.д. По мере опускания шихтовых материалов в доменной печи образуются первичные, промежуточные и конечные шлаки, отличающиеся по составу, свойствам и имеют разное значение для процесса плавки.

Формирование чугуна и шлака также зависит и от ряда других причин: качества и расхода топлива, режима дутья, качества железорудных материалов, профиля печи и других факторов.

При выборе состава и массового соотношения шихтовых материалов, задавшись известным составом чугуна, технологи ведут в дальнейшем весь расчет, ориентируясь на получение состава шлака, обеспечивающего ему регламентируемые физико-химические свойства, которые, в свою очередь, определяют качество выплавляемого чугуна,

интенсивность плавки, ровность хода доменной печи и тем самым оказывают влияние на расход кокса.

Все изучаемые физико-химические свойства расплавов доменных шлаков (удельная теплоемкость, энтальпия, температура плавления, серопоглощительная способность, поверхностное натяжение, плавкость, вязкость, электропроводность и др.) взаимосвязаны между собой и в той или иной степени отражают структурное состояние шлакового расплава, которое определяется химическим составом шлака и термодинамическими условиями состояния расплава (температура, давление).

Оптимальный шлаковый режим обеспечивает ровный ход доменной печи с высокой производительностью и низким расходом кокса и получение кондиционного по сере и кремнию чугуна, что особенно важно для сырьевых условий доменных цехов металлургических предприятий Украины, работающих на высокосернистом коксе.

Таким образом, задача выбора оптимального состава шлака является многокритериальной и требует использования специальных средств оптимизации.

Изложение основных материалов исследования. Исследование процессов формирования и взаимодействия расплавов в восстановительных условиях доменной плавки с использованием развиваемой в ИЧМ НАНУ методологии физико-химического моделирования состава и свойств расплавов позволяет с единых физико-химических позиций обобщать на новом уровне достижения различных подходов к исследованию взаимосвязи между составом, электронной структурой и свойствами соединений, а также описывать результаты ионообменных процессов между реагирующими фазами. Компьютерная реализация и использование в промышленных условиях разработанных физико-

химических критериев и моделей, позволяющих оперативно оценивать состав и свойства продуктов плавки во взаимосвязи с сырьевыми и технологическими параметрами процесса с учетом межатоминого взаимодействия в расплавах, способствует повышению эффективности управления тепловыми процессами и качеством продукции в изменяющихся шихтовых и технологических условиях доменной плавки.

В Институте черной металлургии в качестве методологической основы описания процессов взаимодействия металлической и шлаковой фаз при выплавке чугуна используется методика физико-химического моделирования состава и свойств металлургических расплавов, разработанная Э.В. Приходько [1], а также опыт создания и внедрения информационно-аналитических систем прогнозирования и управления [2].

Определенные наработки в этом направлении реализованы в разработанной и развивающейся в ИЧМ автоматизированной системе «Шлак» [3], в которой использован нетрадиционный подход к решению задач управления качеством чугуна, основанный на прогнозировании состава и свойств продуктов плавки и стабилизации свойств конечного шлака в пределах, обеспечивающих получение чугуна требуемого состава с минимальными энергетическими и сырьевыми затратами.

Для контроля и оптимизации шлакового режима в системе «Шлак», используется комплекс физико-химических и математических моделей, включающий:

– модель металлического и шлакового расплавов для расчета интегральных параметров - химических эквивалентов состава чугуна Z^Y и шлака Δe , а также показателя стехиометрии шлака ρ (аналог основности);

– прогнозные модели для расчета комплекса свойств первичных и конечных шлаков в виде Свойство = $f(\Delta e, \rho)$: 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 ($\square H$, кДж/кг), серопоглотительной способности (C_s), температур начала и конца кристаллизации (ликвидус, Тл, и солидус, Тс, °С), равновесного коэффициента распределения серы (L_s^0) и степени отклонения системы «металл-шлак» от равновесия (ϵ);

– прогнозные модели для расчета коэффициентов межфазного распределения элементов (серы, кремния, марганца, железа) между продуктами плавки в виде уравнений: $L_i = f(\text{параметры шихты}) + f(\text{параметры технологии})$ с использованием показателей шихты (ρ , Δe , содержание Fe_2O_3) и показателей технологии (рудная нагрузка, степень использования CO, теоретическая температура горения, длина фурменной зоны).

Рис.1. Зависимость основных свойств доменных шлаков от физико-химических параметров их структуры Δe и ρ

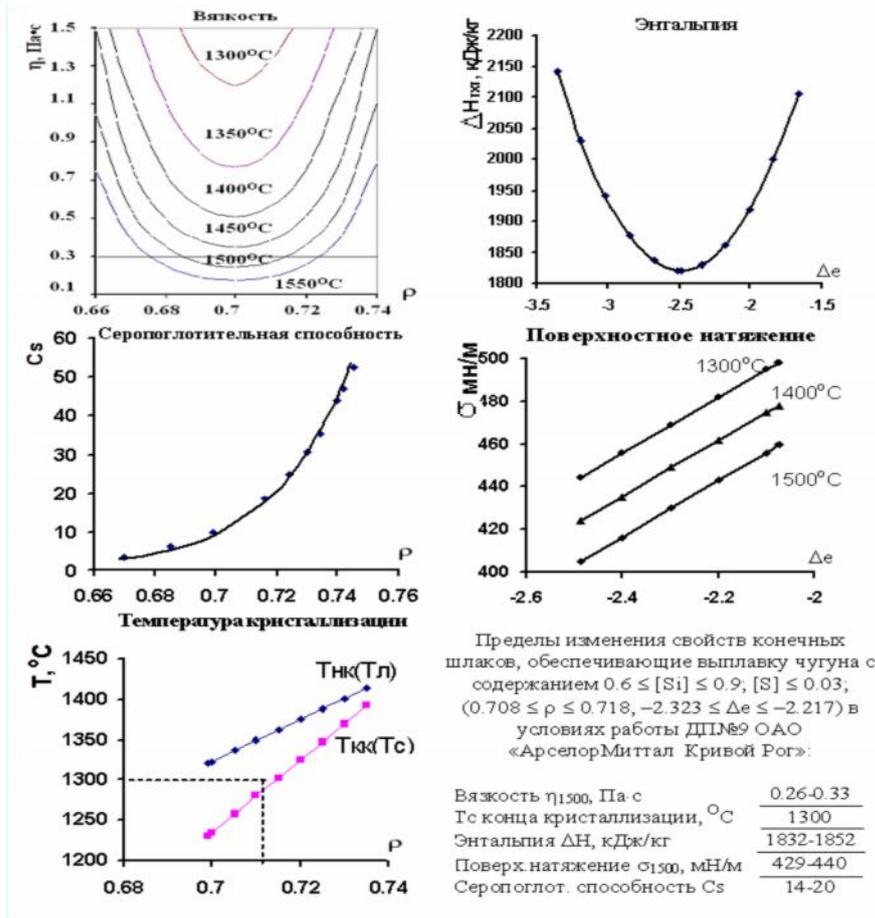


Рис.1. Зависимость основных свойств доменных шлаков

от физико-химических параметров их структуры Δe и ρ

Прогнозирование свойств расплавов осуществляется с учетом межатомного взаимодействия в системе с помощью интегральных показателей $\Delta\epsilon$ и ρ , описывающих химическое и структурное состояние металлического и шлакового расплавов, использование которых позволяет с единых физико-химических позиций обобщать экспериментальные данные различных исследователей. Выполненные исследования показали, что в условиях работы ДПН№9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» вязкость в пределах 0,3 Па·с при температуре 1500 °С, соответствующей обычно выпуску передельного чугуна, обеспечивают шлаки с $\rho = 0,713$. При этом температура кристаллизации шлаков не превышает предельно допустимую величину 1300°С. Путем многомерных сортировок текущих данных о составе и свойствах конечных шлаков получены «интервалы качества» - пределы изменения показателей $\Delta\epsilon$ и ρ ($0,708 \leq \rho \leq 0,718$, $-2,323 \leq \Delta\epsilon \leq -2,217$), которые обеспечивают выплавку кондиционного по сере и кремнию чугуна ($0,6 \leq [\text{Si}] \leq 0,9$; $[\text{S}] \leq 0,03$) в условиях работы ДПН№9. Соответствующие оптимальные диапазоны по свойствам конечных шлаков представлены на рис. 1.

Для решения обратной задачи – определения компонентного состава шлака по заданным ρ и $\Delta\epsilon$ разработана программа визуальной оптимизации составов по граничным значениям его параметров. По обучающей выборке ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-MnO-FeO-CaS}$, $\Delta\epsilon$, ρ), охватывающей компонентный состав шлаков доменных печей Украины строятся поверхности отклика первого порядка (в 7 мерном пространстве). Для визуализации используется проекция сечения гиперплоскости в N-мерном пространстве на координатные плоскости по граничным значениям целевой функции.

Построенная проекция для значений $\Delta\epsilon$ состава $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-MnO-FeO-CaS}$ позволяет получить оптимальные области прогнозных свойств для указанных граничных значений. На рис.2 представлен процесс визуальной оптимизации состава для граничных условий ($-2,323 < \Delta\epsilon < -2,217$) шести сечений составов $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-MnO-FeO-CaS}$. Аналогичные проекции получены для граничных условий ($0,708 < \rho < 0,718$) шести составов $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-MnO-FeO-CaS}$ (рис.3).

Программа позволяет выполнить автоматизированный поиск диапазона состава (прямоугольной области), удовлетворяющего ограничениям M-мерной области. Для рассмотренной поверхности отклика $\Delta\epsilon$ диапазоны компонентного состава, удовлетворяющего указанному интервалу составляют: $37,75 < \text{SiO}_2 < 38,9$; $6,3 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 8,7$; $45,24 < \text{CaO} < 48,7$; $0,1 < \text{FeO} < 1,2$; $4,6 < \text{MgO} < 7,1$; $1,05 < \text{CaS} < 1,55$; $0,12 < \text{MnO} < 1,0$ (рис.2).

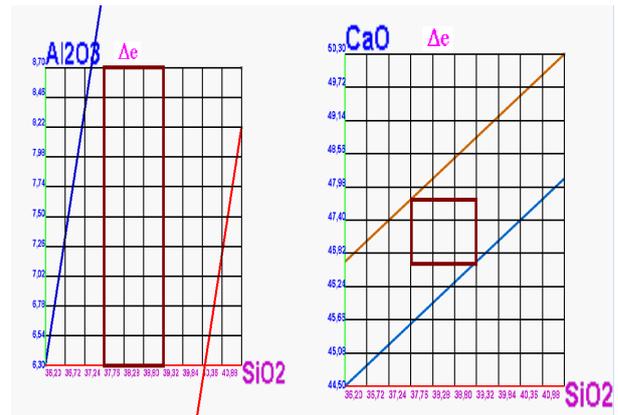


Рис. 2. Покоординатная проекция параметра $\Delta\epsilon$ на плоскости компонентов ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$).

Для поверхности отклика ρ диапазоны компонентного состава, удовлетворяющего указанному интервалу составляют: $37,75 < \text{SiO}_2 < 38,9$; $6,3 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 8,7$; $45,24 < \text{CaO} < 48,7$; $0,1 < \text{FeO} < 1,2$; $4,95 < \text{MgO} < 6,1$; $1,05 < \text{CaS} < 1,7$; $0,12 < \text{MnO} < 1,0$ (рис.3).

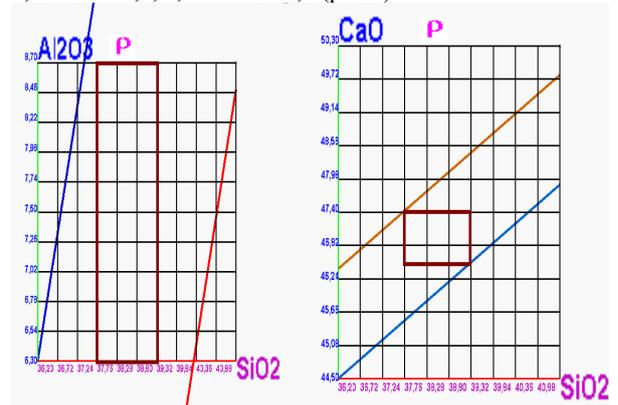


Рис. 3. Покоординатная проекция параметра ρ на плоскости компонентов ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$).

В совокупности для $\Delta\epsilon$ и ρ диапазоны составов: $37,75 < \text{SiO}_2 < 38,9$; $6,3 < \text{Al}_2\text{O}_3 < 8,7$; $45,24 < \text{CaO} < 48,7$; $0,1 < \text{FeO} < 1,2$; $4,95 < \text{MgO} < 6,1$; $1,05 < \text{CaS} < 1,55$; $0,12 < \text{MnO} < 1,0$.

Выводы

Компьютерная реализация и использование в промышленных условиях разработанных физико-химических критериев и моделей, позволяющих оценивать состав и свойства продуктов плавки во взаимосвязи с сырьевыми и технологическими параметрами процесса с учетом межатомного взаимодействия в расплавах, способствует повышению эффективности управления тепловыми процессами и качеством продукции в изменяющихся шихтовых и технологических условиях доменной плавки.

Предложена методика оптимизации компонентного состава доменного шлака на основе визуализации сечений поверхностей «состав-структура-свойство» и обсуждены результаты ее компьютерной реализации для конкретных условий работы доменной печи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приходько Э. В. Теоретические основы физико-химических моделей структуры многокомпонентных материалов. / Э. В. Приходько // Изв. АН СССР. Металлы. — 1991. — № 6. — С. 208—214.
2. Тогобицкая Д. Н. Опыт создания и внедрения системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки в шихтовых и технологических условиях заводов Украины / Д. Н. Тогобицкая, А. И. Белькова, А. Ф. Хамхотько, Д. А. Степаненко // Сб. научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». — Днепропетровск. — 2009. — Вып. 19. — С. 100—112.
3. Физико-химические основы создания системы контроля и управления шлаковым режимом доменной в изменяющихся шихтовых и технологических условиях / Д. Н. Тогобицкая, А. Ф. Хамхотько, А. И. Белькова, П. И. Огорвин // Теория и практика производства чугуна: материалы МНТК, посвященной 70-летию КГТМК «Криворожсталь». — Кривой Рог., 2004 г. — С. 504—508.
4. Приходько Э. В. Базы теоретических и технологических данных для информационных технологий в металлургии. Черная металлургия России и СНГ в XXI веке / Э. В. Приходько, Д. Н. Тогобицкая // Сб. трудов международной конференции. Изд. Металлургия. — 1994. — С. 178—180.

пост.05.06.13

Сведения об авторах

Моделирование процессов взаимодействия расплавов в восстановительных условиях доменной плавки

ФИО	ученая степень, звание	место работы, должность	Сл. телефон, e-mail
Тогобицкая Дарья Николаевна	Доктор технических наук, профессор	Институт черной металлургии НАН Украины (ИЧМ НАНУ), Зав. отделом физико-химических проблем металлургических процессов	р.т. 790-05-28 isi-ofhp@mail.ru
Белькова Алла Ивановна	Кандидат технических наук	ИЧМ НАНУ, отдел физико- химических проблем металлургических процессов, Старший научный сотрудник	р.т. 790-05-28 isi-ofhp@mail.ru
Циватая Наталья Александровна		ИЧМ НАНУ, отдел физико- химических проблем металлургических процессов, Инженер 1-й категории, аспирантка	р.т. 790-05-28 isi-ofhp@mail.ru
Лихачев Юрий Михайлович		ИЧМ НАНУ, отдел физико- химических проблем металлургических процессов, Научный сотрудник	р.т. 790-05-28 isi-ofhp@mail.ru
Скачко Александр Сергеевич		ИЧМ НАНУ, отдел физико- химических проблем металлургических процессов, Ведущий инженер, аспирант	р.т. 790-05-28 isi-ofhp@mail.ru