

УДК 669.162.262.4:681.3

Д.Н. Тогобицкая, А.И. Белькова,  
А.Ф. Хамхотько, Д.А. Степаненко, А.Ю. Гринько

## **СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ДОМЕННОЙ ШИХТЫ**

*Аннотация. Изложен нетрадиционный подход к решению задачи выбора рационального состава доменной шихты, основанный на прогнозировании состава и свойств продуктов плавки и стабилизации свойств конечного шлака в пределах, обеспечивающих получение чугуна требуемого состава. Показана возможность обоснованного выбора состава шихты в современных нестабильных условиях доменной плавки с использованием отходов металлургического производства или вторичного сырья.*

*Ключевые слова: доменная шихта, свойства, чугун, шлак, коэффициенты распределения, автоматизированная система*

### **Современное состояние вопроса**

В современных условиях доменного производства, связанных с необходимостью экономии энергетических и сырьевых ресурсов и вовлечением отходов и вторичных ресурсов, актуальными являются вопросы разработки и внедрения в производство новых подходов к формированию рационального состава шихты, обеспечивающего оптимальные свойства шлаковых расплавов и выплавку чугуна требуемого состава

Учет всех взаимосвязей в таком многофакторном процессе как доменный, получение решений и рекомендаций, отвечающих современным требованиям, можно осуществить лишь при системном подходе к рассмотрению влияния различных факторов и широком применении адекватных математических моделей.

**Целью данного исследования** является разработка и программная реализация нового подхода к выбору оптимального состава доменной шихты в современных нестабильных сырьевых и технологических условиях доменной плавки.

### **Постановка задачи**

Многокомпонентность доменной шихты, неоднородность шихтовых материалов по химическому и гранулометрическому составам, металлургическим свойствам вызывают существенную колеблемость химических составов чугуна и шлака. Обеспечение заданного качества чугуна требует не только соответствующего состава шихты, но и определенного шлакового режима, зависящего в значительной степени от применяемого уровня технологии. Одним из приемов оптимизации шлакового режима является определение диапазонов изменения показателей шлака, в пределах которых его физико-химические и

технологические свойства удовлетворяют предъявляемым требованиям и отличаются термодинамической устойчивостью.

В Институте черной металлургии НАНУ решение таких задач осуществляется на основе методики физико-химического моделирования железоуглеродистых и шлаковых расплавов [1], а также методологии создания и внедрения информационно-аналитических систем прогнозирования и управления. Для выбора рационального состава шихты в нестабильных сырьевых условиях с целью получения кондиционного чугуна создана и развивается автоматизированная система контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки «Шлак» [2] (рис.1).



Рисунок 1 – Структурная схема автоматизированной системы «Шлак»

В системе реализован нетрадиционный подход к решению задач управления качеством чугуна, основанный на прогнозировании состава и свойств продуктов плавки и стабилизации свойств конечного шлака в пределах, обеспечивающих получение чугуна требуемого состава. Необходимость вовлечения отходов, вторичных ресурсов и промывочных материалов в состав шихты в настоящее время обуславливает развитие физико-химических основ системы в части выявления закономерностей влияния различных шихтовых добавок, содержащих вредные примеси, на свойства формируемых расплавов и процессы взаимодействия между ними

с целью повышения адекватности прогнозных моделей, реализующие взаимосвязь энергетических и сырьевых факторов и используемые для решения задач оптимизации шихты и качества чугуна.

#### Изложение основных материалов исследования

Эффективность автоматизированной системы, предназначенной для совершенствования существующих способов ведения плавки, в значительной степени определяется физичностью моделей описания состояния шихтовых материалов в печи, формирования жидких фаз, а также процессов их взаимодействия.

В ИЧМ НАНУ ведутся системные работы по организации и накоплению сведений о свойствах шихтовых материалов и доменных шлаков, определенных разными исследователями и опубликованных в печати. Они сконцентрированы в базах фундаментальных физико-химических и технологических данных банка данных “Металлургия” о свойствах шлаковых и металлических расплавов, железорудного сырья, а также результатах их взаимодействия (базы данных «Шлак», «Железорудные материалы», «Шлак-Металл») [3], которые являются информационной основой для разработки прогнозных моделей свойств железорудного сырья и металлургических расплавов.

Такой подход к моделированию свойств расплавов на основе интегральных физико-химических параметров «свертки» информации о полном химическом составе шихтовых материалов, чугуна и шлака позволяет решать в системе «Шлак» задачи оперативного прогноза состава и свойств продуктов плавки по составу подачи и оптимизации шихтовых и технологических условий, обеспечивающих выплавку чугуна заданного качества за счет поддержания оптимальных значений свойств шлака.

На основе экспериментальных данных о свойствах натуральных доменных шлаков, близких по составу к шлакам заводов Украины, получены прогнозные модели для расчета вязкости ( $\eta$ , Па·с), поверхностного натяжения ( $\sigma$ , мН/м) для заданной температуры, энтальпии ( $\Delta H$ , кДж/кг) при температуре хорошей текучести шлака, температур начала ( $T_L$ , °С) и конца кристаллизации ( $T_C$ , °С). Зависимости вязкости конечного шлака при температуре 1500 °С, серопоглотительной способности и энтальпии от физико-химических параметров структуры и состава шлаковых расплавов  $\Delta e$  и  $\rho$  ( $\eta_{1500} = f(\rho)$ ,  $C_S = f(\rho)$  и  $\Delta H = f(\Delta e)$ ) имеют экстремальный характер, что позволяет их использовать в качестве критериев стабилизации шлакового режима при решении практических задач оптимизации состава загрузаемой шихты.

Оптимальный состав шлака определяется численными значениями  $\Delta e$  и  $\rho$ , обеспечивающими вязкость в пределах 0.3 Па·с и температуру затвердевания 1300°С. При этом величина серопоглотительной способности стремится к максимуму, а величина энтальпии и поверхностного

натяжения - к минимуму, что обеспечивает хорошую десульфурацию чугуна и снижение расхода кокса.

В случае выхода рассчитанных показателей  $\Delta e$  и  $\rho$  за пределы «интервалов качества» на графиках  $C_S$ , вязкости и энтальпии система позволяет выполнить корректировку состава шихты и параметров дутьевого режима для получения оптимальных свойств шлака, обеспечивающих его высокую серопоглотительную способность и требуемое качество чугуна.

Для расчета химического состава чугуна и шлака по загружаемой шихте с учетом технологических приемов ведения плавки в системе реализована методика моделирования коэффициентов межфазного распределения элементов ( $L_{\Sigma}$ ), отправным постулатом которой является их зависимость от конкретных шихтовых и технологических условий [4]. В качестве критериев, характеризующих свойства шихтовых материалов, используются параметры  $\rho$  и  $\Delta e$ , определяющие активность и направленность переходных процессов перераспределения элементов, а в качестве технологических показателей - основные параметры работы печи.

При построении прогнозных моделей для снижения их параметричности используются методы многомерного сравнительного анализа, в частности, методы прикладной статистики и факторный анализ, что позволяет понизить размерность и повысить точность моделей, описывающих закономерности формирования состава и свойств этих систем в различных технологических процессах, а также "унифицировать" набор физико-химических критериев, минимальное число которых наиболее полно характеризует структуру и свойства веществ, независимо от числа компонентов и комплекса свойств.

Прогнозные модели коэффициентов распределения серы, кремния, марганца, железа зависят от показателей состава шихты ( $F_{Ш}$ ) и технологии ( $F_T$ ):  $L_{\Sigma} = f(F_{Ш}; F_T)$ , на основе которых осуществляется прогноз состава первичных и конечных расплавов, а также свойств шлаков. В качестве параметров технологии в модель включены интегральные показатели дутьевого режима, такие как теоретическая температура горения  $T_T$  и длина фурменной зоны  $L_{фз}$ , использование которых позволяет более точно учесть тепловое состояние горна печи, количественно конкретизировать и оценить степень влияния различных факторов плавки на ее качественные показатели.

С помощью системы «Шлак» можно в режиме реального времени прогнозировать состав и свойства чугуна и шлака на этапе формирования подачи, осуществить ее корректировку с учетом показателей дутьевого режима на основе критериев стабилизации технологических свойств шлака в установленных «интервалах качества». Так, например, в результате проведенных с помощью системы расчетно-аналитических исследований влияния отходов металлургического производства на свойства получаемых расплавов выполнена оценка возможности применения отходов ферросплавного производства (материала офлюсованного

железосодержащего - МОЖ) в проплавленной шихте для промывки горна в ДЦ №1 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Пример расчета продуктов плавки по шихте с промывкой МОЖ и железной рудой для одного из характерных выпусков представлен на рис. 2, 3.

Остаток шихтовых материалов		Параметры технологии													
	N	Наименование компо	Вес (т)	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	MnO	S	Fe	FeO	Cr2O3	Влага	Выход	
ВЕС ПРОМ. МАТЕРИАЛА	21.4	1 К	КОКС	14.25	0.00	0.00	0.00	0.00	1.050	0.00	0.00	0.00	3.00	1.40	
		2	Z КОКСА, %	11.70	43.55	25.00	3.93	1.48	0.75	0.000	13.40	0.00	0.00	0.00	
	16.9	А	АГЛОМЕРАТ МП	34.92	8.80	1.50	10.10	1.70	0.60	0.027	55.30	16.70	0.00	0.00	3.00
	11.2	4	АГЛОМЕРАТ ГОК I	23.28	9.10	1.35	11.25	1.50	0.30	0.027	55.00	12.93	0.00	0.00	3.00
	2	5	АНТРАЦИТ	2.00	4.20	1.87	0.25	0.14	0.10	1.280	0.41	0.00	0.00	4.80	0.00
	0.8	6	ИЗВЕСТНЯК	0.80	0.42	0.60	55.16	0.82	0.05	0.030	2.00	0.00	0.00	2.40	0.00
	15	7	РУДА ЖЕЛЕЗНАЯ	0.00	26.88	0.53	0.30	0.51	0.05	0.031	46.60	10.00	0.00	3.20	0.00
	15	8	МОЖ	0.00	15.50	0.91	24.90	2.90	0.01	0.000	48.10	35.13	9.81	1.00	0.00

РАСЧЕТ ВЕСА ПРОМЫВОК	ПРОБЫ КОКСА:	РАСЧЕТ НА КОЛ-ВО ПОДАЧ:	11
	M25: 87.7	M10: 8.3	ИЗ НИХ КОЛ-ВО ПРОМЫВОЧНЫХ:

Рисунок 2 - Формирование загружаемой подачи с промывочными материалами в системе «Шлак»

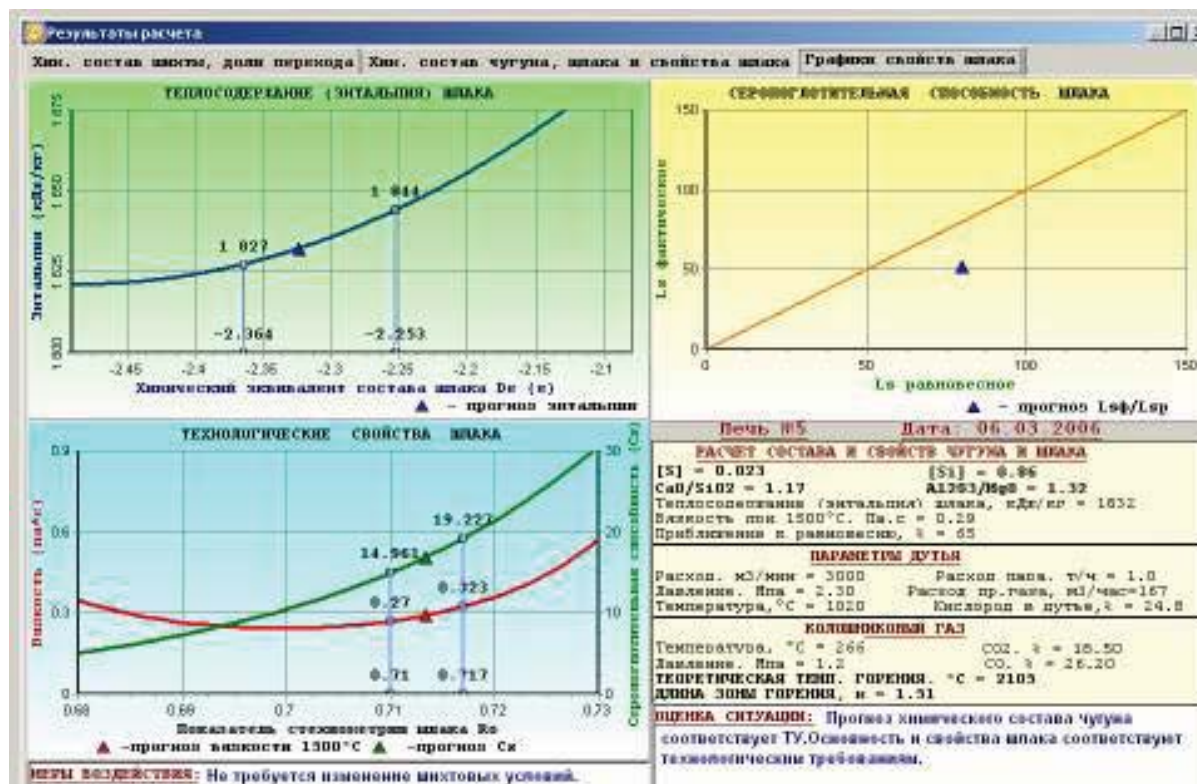


Рисунок 3 - Прогноз состава чугуна и свойств шлака по загружаемой шихте с промывкой МОЖ и показателем дутьевого режима в системе «Шлак»

Выполненная оценка влияния МОЖ на свойства шлаков в совокупности с исследованиями, проведенными на ДП№5 по их использованию в промывочной шихте, показала, что технологические параметры доменной плавки ДП№ 5 в исследуемый период остались на требуемом уровне. Удельный расход кокса был снижен на 1,7 кг/т чугуна, шлаки при этом имели пониженную энтальпию. Поверхностное натяжение шлаков уменьшилось, в результате чего эффективнее прошли процессы десульфурации при том же уровне значения вязкости. Сход шихты стал более ровным, снизился общий перепад давления газа по высоте доменной печи. Применение МОЖ позволило частично устранить загромождение горна и, как следствие, в опытный период не было заменено ни одной воздушной фурмы.

В автоматическом режиме корректировка загружаемой шихты осуществляется путем задания ограничений на ресурсы управления и показатели плавки на основе оптимизационных расчетов с выдачей конкретных рекомендаций по изменению параметров загружаемой шихты или дутьевого режима.

#### Выводы

Для решения задачи выбора рационального состава доменной шихты, разработан новый подход к оптимизации состава доменной шихты и шлакового режима, основанный на прогнозировании состава и свойств продуктов доменной плавки и процессов взаимодействия между ними с использованием интегральных критериев, характеризующих структуру и химический состав железоуглеродистых и шлаковых расплавов, свойства шихтовых материалов и температурные условия процесса, который реализован в автоматизированной системе «Шлак». Система «Шлак» позволяет корректировать базовые и текущие показатели загрузки шихты и технологии для получения кондиционного по сере и кремнию чугуна благодаря стабилизации технологических свойств шлака в указанных «интервалах качества».

Показана возможность обоснованного выбора рационального состава шихты при разработке нетрадиционных подходов к ее формированию с использованием отходов металлургического производства или вторичного сырья на примере использования в шихте отходов ферросплавного производства (МОЖ), который может быть применен как промывочный материал горна печи в ряде мер по стабилизации хода доменной печи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Приходько Э.В. Металлохимия многокомпонентных систем / Э.В. Приходько. – М. : Металлургия, 1995. – 320с.
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. 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.

4. Тогобицкая Д. Н. Влияние шихтовых и технологических условий на межфазное распределение элементов при выплавке чугуна в условиях КГГМК «Криворожсталь» / Д. Н. Тогобицкая, А. И. Белькова, А. Ю. Гринько и др. // Тр. МНТК «Теория и практика производства чугуна», посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь». – Кривой Рог. 24-27 мая 2004г. – С. 320-324.