

**А.Ф.Хамхотько, Д.Н.Тогобицкая, А.С.Нестеров, П.И.Оторвин,  
В.С.Евглевский**

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЕРВИЧНЫХ ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ**

Разработана методика расчета состава и свойств первичных доменных шлаков, которая включена в систему контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки «Шлак» на ДП№5 ОАО «Криворожсталь»

### **Современное состояние вопроса.**

Известно, что процесс формирования первичных шлаков идет параллельно с процессом восстановления железа из оксидов в шахте печи. Положение зоны первичного шлакообразования в печи зависит от состава шихты и распределения температур по высоте печи. В связи с этим свойства первичных шлаков оказывают влияние на наиболее важные стороны доменного процесса на ход печи и на нагрев горна [1]. Обычно под первичными имеют в виду шлаки, к которым еще не присоединилась зола кокса [2] и которые содержат определенное, иногда значительное, количество невосстановленного железа в виде FeO, как показано исследованиями, в частности, Гиммельфарба А.А. [3]. Если содержание основных шлакообразующих компонентов (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO) в первичных шлаках довольно просто вычисляется по составу шихты балансовым методом, то вычисление FeO является проблематичным.

### **Изложение основных материалов исследования.**

На первом этапе исследования на основе практического опыта работы доменных печей нами было принято допущение, что в первичный шлак из шихты переходит 45% FeO. И это позволяло выполнять оценочные расчеты состава и свойств первичных доменных шлаков [4]. Более точно оценить количество FeO в первичном шлаке позволила созданная в Институте черной металлургии установка по изучению процессов фильтрации жидких продуктов при нагреве на коксовой насадке различных железорудных материалов и их смесей в условиях, приближенных к реальному доменному процессу [5]. Накопленный значительный экспериментальный материал в соответствующей базе данных позволил получить модели для прогнозирования количества FeO в первичных шлаках и температурных характеристик фильтрации железорудных материалов при восстановительном нагреве. Химический состав, свойства и модельные параметры железорудных материалов для условий ОАО «Криворожсталь» представлены в табл.1 и 2. Для построения прогнозных моделей сформирована представительная выборка данных в широком диапазоне составов и свойств: CaO – 0,07–16,43; SiO<sub>2</sub> – 3,5–13,42; MgO – 0,2–3,29; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,45–4,09; FeO – 1,68–56,76; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 25,65–89,77; Fe<sub>общ</sub> – 47,3–62,43; T<sub>нф</sub> – 1245–

1475;  $T_{\text{мф}} - 1400-1500$ ;  $\text{FeO}_{\text{пш}} - 6,02-73,57$ , где  $T_{\text{нф}}$  – температура начала фильтрации,  $T_{\text{мф}}$  – температура максимальной фильтрации шлака.

Таблица 1. Состав некоторых железорудных материалов для условий ОАО «Криворожсталь»

№ п/п	Наименование материала	Химический состав, мас. %						
		CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>обш.</sub>
1	Агломерат НКГОК–1	12,25	9,4	1,24	1,46	11,37	64,36	53,85
2	Агломерат АЦМК	11,82	10,24	1,1	1,36	15,05	59,85	53,56
3	Окатыши СевГОК	3,92	9,15	0,53	0,45	1,59	84,15	60,09
4	Агломерат НКГОК–2	11,85	9,37	1,16	1,53	9,61	66,67	54,09
5	Средневзвешенная смесь НКГОК–2 70%+ОкСевГОК30%	9,47	9,3	0,97	1,21	7,2	71,92	55,90

Таблица 2. Модельные параметры, интервал фильтрации железорудных материалов и содержание FeO в первичном шлаке.

№ п/п	Свойства			Параметры структуры шлакообразующей составляющей		
	$T_{\text{нф}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{мф}}, ^\circ\text{C}$	$\text{FeO}_{\text{пш}}, \%$	$\Delta\epsilon$	$\text{tg}\alpha$	$\rho$
1	1360	1490	13,60	-2,178	0,133	0,718
2	1330	1450	18,80	-2,291	0,131	0,703
3	1340	1480	43,60	-3,283	0,116	0,609
4	1370	1460	16,60	-2,197	0,132	0,714
5	1355	1500	28,60	2,423	0,129	0,690

На основе данной выборки с использованием теоретических представлений о структуре оксидных материалов, разработанных в ИЧМ Приходько Э.В., и обоснованных нами критериев «свертки» химического состава шихты [6] для расчета количества FeO в первичном шлаке по составу доменной шихты и аналогичных уравнений для оценки интервала фильтрации через коксовую насадку жидких продуктов, образующихся при восстановительно–тепловой обработке шихты в доменной печи, получены следующие модели:

Содержание FeO в первичном шлаке, %

$$\text{FeO}_{\text{пш}} = A_1 + B_1\rho_{\text{пш}} + C_1\text{FeO} + D_1\text{Fe}_2\text{O}_3, \quad r=0,835 \quad (1)$$

Температура начала фильтрации, °C

$$T_{\text{нф}} = A_2 + B_2\rho_{\text{пш}} + C_2\text{FeO} + D_2\text{Fe}_2\text{O}_3, \quad r=0,713 \quad (2)$$

Температура максимальной фильтрации, °C

$$T_{\text{мф}} = A_3 + B_3\rho_{\text{пш}} + C_3\text{FeO} + D_3\text{Fe}_2\text{O}_3, \quad r=0,5 \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{пш}}$  – стехиометрия шлакообразующей составляющей доменной шихты (CaO, SiO<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – содержание в шихте.

Алгоритмы вычисления FeO в первичных шлаках и интервала фильтрации по выше описанным уравнениям включены в состав программного

обеспечения для расчета состава и свойств продуктов доменной плавки по составу подачи.

На втором этапе исследований нами были уточнены прогнозные модели для температуры плавления первичных шлаков и их вязкости при различных температурах. Изучению свойств первичных доменных шлаков посвящены работы ряда авторов [7–14]. При этом, несмотря на различие составов исследованных групп шлаков (высокоглиноземистых, магнезиальных, кислых, основных и т.д.), практически однозначным во всех исследованиях является вывод о значительном разжижающем влиянии FeO. Так, в работе [13] при изучении вязкости шлаков в системе CaO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO с добавками FeO показано, что при различных содержаниях Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgO, различной основности и различных температурах с увеличением содержания FeO в шлаках от 0 до 12% вязкость этих шлаков уменьшается в 1,5 – 5 раз. Однако данные, проведенные в работе [13] практически невозможно использовать для создания моделей прогнозирования температуры плавления и температурной зависимости вязкости первичных шлаков из-за отсутствия полной вискозиметрической характеристики изученных авторами шлаков.

В связи с этим нами были использованы исходные данные А.А.Гиммельфарба о вязкости шлаков четырехкомпонентной системы CaO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–FeO, опубликованные в работе [14]. Для получения прогнозных моделей свойств шлаков, близких к шихтовым условиям «Криворожстали», в качестве базовых нами выбраны данные о шлаках с содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в диапазоне 5–10 мас.%. Температуру начала плавления шлаков определяли по кривым  $lg\eta = f(1/T)$  при резком повышении вязкости выше 5 Па·С. Температура начала плавления при нагреве твердого шлака соответствует его температуре полной кристаллизации (затвердевания) при охлаждении расплава.

В результате корреляционно–регрессионного анализа получены зависимости свойств шлаков от модельных параметров их структуры:

Температура начала плавления первичных шлаков, °С

$$T_{\text{пл}} = A_4 + B_4\text{FeO} + C_4\text{De} + D_4\rho + E_4\rho^2 r=0,81 \quad (4)$$

Вязкость первичных шлаков, Па·С

$$lg\eta = A_5 + B_5\text{FeO} + C_5\rho + D_5\rho^2 + E_5 \cdot (1000/T) r=0,84 \quad (5),$$

где FeO, % – содержание FeO в первичном шлаке, De – химический эквивалент шлака, ρ – стехиометрия шлака, T, °С – температура шлака.

В табл.3 представлены результаты оценки колеблемости свойств первичных шлаков по вышеописанным моделям для условий работы доменной печи №5 по данным за январь–май 2004 г.

Как видно из табл.3, в реальных условиях диапазон изменения состава и свойств первичных шлаков довольно существенный. Представленные на рис.1 и 2 зависимости свидетельствуют о разжижающем действии FeO.

Таблица 3. Диапазон изменения расчетных показателей первичных шлаков для условий работы ДПЛ№5 (январь–май 2004 г).

	Показатели	минимум	максимум	среднее
Состав оксидов железорудной части шихты (без золы кокса)	SiO <sub>2</sub>	9,61	10,86	10,03
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,95	2,06	1,04
	CaO	11,25	13,19	12,26
	MgO	1,15	1,55	1,27
	MnO	0,23	0,68	0,35
	FeO	11,57	14,63	13,34
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	57,61	63,12	60,92
	S	0,035	0,077	0,038
Интервал фильтрации шихты	CaO/SiO <sub>2</sub>	1,05	1,33	1,22
	$T_{\text{нф}}$	1331	1351	1345
	$T_{\text{мф}}$	1491	1500	1497
	FeO <sub>шп</sub>	19,38	25,16	21,44
	$\Delta e$	-3,237	-2,907	-3,034
Свойства первичного шлака	$\rho$	0,744	0,754	0,745
	$T_{\text{нп}}$	1184	1262	1233
	$\eta_{1300}$	0,352	0,785	0,582

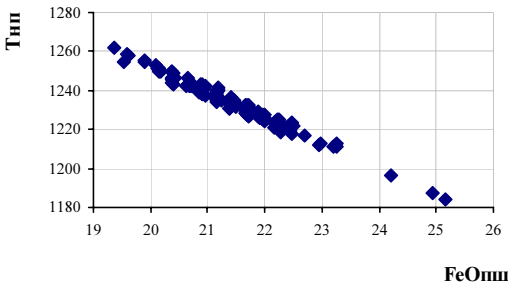


Рис.1. Зависимость температуры начала плавления первичных шлаков от содержания FeO

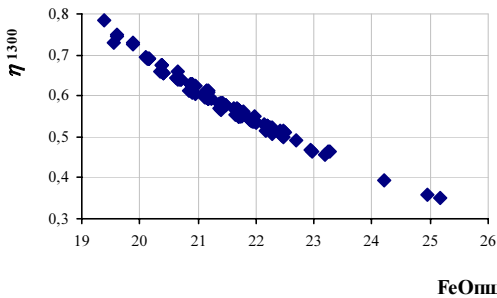


Рис.2. Зависимость вязкости первичных шлаков при 1300<sup>0</sup>С от содержания FeO

### Выводы.

Полученные уравнения положены в основу программного обеспечения расчета свойств первичных шлаков в составе подсистемы «Прогноз» системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки «Шлак», установленной на ДП№5, а также на рабочих станциях специалистов ЦЗЛ и ТУ. Эта подсистема может быть использована для оценки положения зоны когезии в изменяющихся шихтовых условиях.

1. *Вегман Е.Ф., Херебин Б.Н., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С.* Металлургия чугуна. –М.: «Металлургия», 1978. –480 с.
2. *Остроухов М.Я., Шнарбер Л.Я.* Эксплуатация доменных печей. –М.: «Металлургия», 1975. –264 с.
3. *Гиммельфарб А.А.* К вопросу о выборе оптимального состава первичного шлака доменной плавки. //В сб. «Шлаковый режим доменных печей». –М.: «Металлургия», 1967. –С.84–98.
4. *Белькова А.И., Тогобицкая Д.Н., Хамхотько А.Ф., Можаренко Н.М.* Выбор состава доменной шихты, обеспечивающей заданные свойства шлака. //Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. –Киев.: «Наукова думка», 2001. –№4. –С.51–55.
5. *Гладков Н.А., Нестеров А.С.* Процессы в слое железорудных материалов при его нагревании. //Металлы. –1987. –№3. –С.9–11.
6. *Приходько Э.В., Хамхотько А.Ф., Тогобицкая Д.Н. и др.* Роль химического состава железорудных материалов в формировании их металлургических свойств. –М.: Ин-т «Черметинформация». –1987. –Вып.5. –25 с.
7. *Цылев Л.М., Жило Н.Л., Соколов Г.А.* Вязкость натуральных первичных и конечных доменных шлаков литейного и передельного чугуна. //Тр. ИМЕТ им. А.А. Байкова. –Вып.3. –М.: Изд. АН СССР. –1958. –С.35–51.
8. *Жило Н.Л., Цылев Л.М.* Вязкость первичных и конечных доменных шлаков при выплавке ферросплавов в доменной печи. //Изв. АН СССР. ОТН. –1955. –№10. –С.90–106.
9. *Жило Н.Л., Руднева А.В., Соколов Г.А., Цылев Л.М.* К исследованию вязкости первичных шлаков. //Изв. АН СССР. ОТН. –1957. –№2. –С.27–35.
10. *Онорин О.П., Гладышев В.И., Каплун Л.И., Муравьева Е.Л.* Физико-химические свойства первичных доменных шлаков с повышенным содержанием глинозема. //Изв. ВУЗов Чер.мет. –1986. –№8. –С.17–20.
11. *Жило Н.Л., Фадеева А.С., Денисов А.В. и др.* Исследование свойств железорудных расплавов доменной плавки. //Металлы. –1986. №5. –С.3–8.
12. *Потебня Ю.М., Рихтер Р.Г., Аносов Б.Г.* Изучение свойств первичных магnezальных шлаков. //Металлургия и коксохимия. Вып.19. Киев: «Техника», 1970. –С.25–30.
13. *Кухтин Т.И., Дунаев Н.Е., Слепцов Ж.Е. и др.* Физико-химические и металлургические свойства доменных шлаков в четвертной системе CaO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO с добавками FeO. //Изв. ВУЗов. Чер.мет. –1985. –№8. –С.17–21.
14. *Гиммельфарб А.А.* Вязкость шлаков четырехкомпонентной системы CaO–SiO<sub>2</sub>–FeO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. //Металлы. –1968. –№2. –С.59–70.

*Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. Э.В.Приходько*