

Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотько, А.И. Белькова,  
П.И. Оторвин, С.В. Нынъ

## ОПТИМИЗАЦИЯ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ В УСЛОВИЯХ КОМБИНАТА «КРИВОРОЖСТАЛЬ».

*Институт черной металлургии НАН Украины, ОАО «Криворожсталь»*

Показано, что использование на доменных печах ОАО «Криворожсталь» автоматизированной системы «Шлак» позволяет обеспечить оперативный прогноз и стабилизацию технологических свойств конечного шлака, получить данные для корректировки состава подачи и обеспечить выплавку чугуна заданного качества.

### **Постановка задачи.**

Для стратегического, текущего и оперативного управления шлаковым режимом с целью получения чугуна заданного качества, а также для экспертной оценки технологической ситуации и выявления случаев отклонения технологических свойств шлака от допустимых величин нами разработана автоматизированная система «Шлак». В режиме контроля шлакового режима система «Шлак» обеспечивает оперативный прогноз технологических свойств шлака: серопоглолительной способности ( $C_s$ ), вязкости при любой температуре на выпуске ( $\eta$ , Па·с), температур начала кристаллизации (ликвидус,  $T_l$ , °С) и конца кристаллизации (солидус,  $T_c$ , °С), энтальпии (теплосодержания) при температуре хорошей текучести, соответствующей вязкости 0,3 Па·с ( $\Delta H$ , кДж / кг), поверхностного натяжения при любой температуре ( $\sigma$ , мН/м). Конечные доменные шлаки должны обладать высокой серопоглолительной способностью, хорошей текучестью и другими свойствами, обеспечивающими благоприятные кинетические условия для реализации этой серопоглолительной способности.

### **Методы исследования.**

В реальных условиях ОАО «Криворожсталь» для получения чугуна с содержанием серы до 0,035% необходимо обеспечивать серопоглолительную способность конечного доменного шлака, рассчитанную по разработанной нами модели на основе экспериментальных данных Жмойдина Г.И. и Куликова И.С. [1] на уровне  $C_s \approx 14\div 19$ . При снижении  $C_s$  менее 14 шлаки становятся «кислыми», что приводит к увеличению содержания серы в чугуне более 0,035%. При увеличении  $C_s$  более 19 шлаки становятся «основными», увеличивается их серопоглолительная способность, однако при этом увеличивается вязкость, поверхностное натяжение, температура начала и конца кристаллизации шлаков, что приводит к ухудшению кинетических условий, и их серопоглолительная способность реализуется не в полной мере.

Оптимальной на выпуске из горна по данным [2], является вязкость 0,3 Па·с, которая обеспечивает хорошую текучесть и диффузионную подвижность конечных шлаков и способствует реализации их серопоглотительного потенциала. На рис.1 представлена зависимость вязкости конечных доменных шлаков заводов Украины при различной температуре от их химического состава, «свернутого» в виде коэффициента стехиометрии ( $\rho$ ), равного соотношению катионов к анионам [3], и показана линия оптимальной вязкости 0,3 Па·с. В частности, при температуре 1500<sup>0</sup>С, соответствующей обычно выпуску передельного чугуна, эту вязкость обеспечивают шлаки со стехиометрией  $\rho \approx 0,715$ , которые и являются оптимальными по составу с точки зрения вязкости. Дальнейшее снижение вязкости до величины  $\leq 0,2$  Па·с усиливает агрессивное воздействие шлаков по отношению к футеровке печи в соответствии с законом Нернста-Эйнштейна [4].

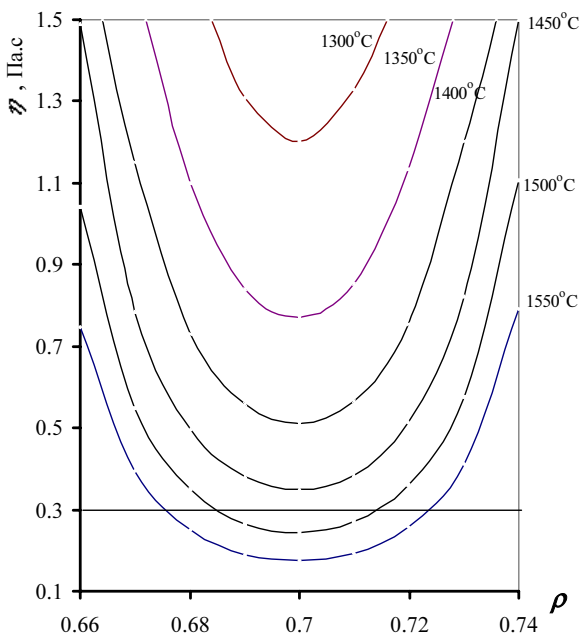


Рис.1. Зависимость вязкости конечных доменных шлаков заводов Украины от их состава и температуры.

По данным [5,6] температура кристаллизации (затвердевания) —  $T_c$  конечных доменных шлаков при получении передельного чугуна не должна превышать 1300<sup>0</sup>С. Более высокая

$T_c$  шлака приводит в случае похолодания печи к его кристаллизации, образованию гарнисажа, сокращению рабочего пространства горна и требует повышенного расхода кокса. При пониженной  $T_c$  уменьшается серопоглотительный потенциал «кислого» шлака. На рис.2 представлена зависимость температурного интервала кристаллизации конечных доменных шлаков заводов Украины от их стехиометрии  $\rho$  и показана предельно допустимая величина  $T_c$ , которая соответствует  $\rho \approx 0,715$ , как и в случае вяз-

кости. При превышении  $\rho > 0,715$ , а следовательно при росте основности шлаков, они становятся менее устойчивыми, что видно из уменьшения их интервала кристаллизации  $\Delta T = T_{л} - T_{с}$ .

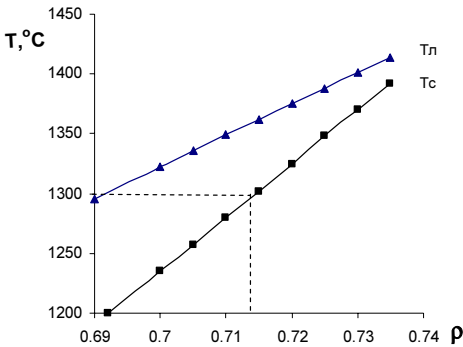


Рис. 2. Температурный интервал кристаллизации доменных шлаков заводов Украины.

Таким образом, оптимальными по основным технологическим свойствам (вязкости и пласткости) являются конечные доменные шлаки со стехиометрией  $\rho \approx 0,715$ , что в шихтовых условиях ОАО «Криворожсталь» приблизительно соответствует их основности  $\text{CaO/SiO}_2 \approx 1,22$

### Результаты исследования.

Нами с использованием системы «Шлак» в шихтовых условиях доменной печи №5 была сформирована в качестве базовой типичная (среднестатистическая) подача, в которой железорудная часть составляет 61 т и количество кокса соответствует рудной нагрузке 4,3. Доли перехода компонентов шихты (Si, Mn, S, Fe) в продукты плавки приняты постоянными, соответствующими среднестатистическим величинам за год. В диапазоне существующей колеблемости состава подачи за год исследовали влияние на состав и свойства продуктов плавки следующих факторов:

1. Соотношения агломератов МП и ГОК1.
2. Соотношения агломерата МП и окатышей СевГОК.
3. Количества известняка в подаче.
4. Количества кокса.
5. Количества золы в коксе.
6. Количества руды.
7. Основности агломерата МП.
8. Количества MgO в агломерате.

Результаты исследования представлены в табл.1 в виде факторов влияния, которые позволяют осуществлять направленное воздействие на доменную шихту в подаче с целью получения конечного шлака требуемого состава и свойств: оптимальной вязкости  $\eta \approx 0,3$  Па·с, температуры затвердевания  $T_{л} \approx 1300^{\circ}\text{C}$  и высокой серопоглощательной способности, которые обеспечивают получение чугуна с низким содержанием серы.

Для регулирования серопоглощательной способности, вязкости и температуры затвердевания конечного шлака посредством изменения сте-

хиометрии  $\rho$  (и соответственно основности  $\text{CaO/SiO}_2$ ) мастером выбирается необходимый компонент подачи в соответствии со сложившимися шихтовыми условиями и выполняется расчет его количества с использованием факторов влияния, приведенным в табл.1.

Для проверки разработанных рекомендаций была выбрана реальная подача на ДП№5 в августе 2004 г., которой соответствовал выпуск чугуна с  $[\text{S}]=0,039$  и шлака с низкой основностью  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,131$ , стехиометрией  $\rho_{\text{нач}} = 0,709$  и вязкостью  $\eta_{1500} = 0,265$  Па·с на нижнем пределе интервала качества (табл.2, рис.3).

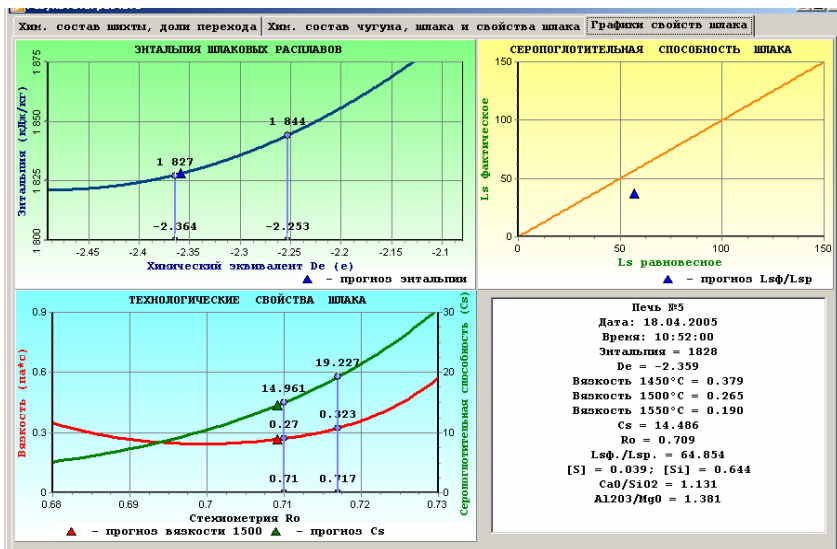


Рис. 3. Диалоговое окно автоматизированной системы «Шлак»

Для повышения стехиометрии шлака до  $\rho_{\text{кон}} = 0,715$  в соответствии с разработанными факторами влияния (табл.1) были рассчитаны следующие варианты подшихтовки.

**Вариант 1.** Изменение расхода известняка.

$$\Delta\rho = \rho_{\text{кон}} - \rho_{\text{нач}} = 0,715 - 0,709 = 0,006$$

В соответствии с табл.1 каждые 100 кг известняка в подачу взамен агломерата МП увеличивают  $\rho$  на 0,00073. Для достижения  $\rho_{\text{кон}} = 0,715$  необходимо добавить:  $(0,006:0,00073) \times 100 = 821$  кг = 0,821 т известняка. Следовательно, количество известняка в подаче составит:  $0,5 + 0,82 = 1,32$  т. Соответственно, количество агломерата МП составит:  $33,6 - 0,82 = 32,78$  т.

Выполненный расчет показал, что в результате такой корректировки следует ожидать получение чугуна с  $[\text{S}]=0,026$  и шлака основностью

$\text{CaO}/\text{SiO}_2=1,19$ , стехиометрией  $\rho=0,714$  и вязкостью  $\eta_{1500} = 0,292$  Па·с, который попадает в середину интервала качества (рис.4).

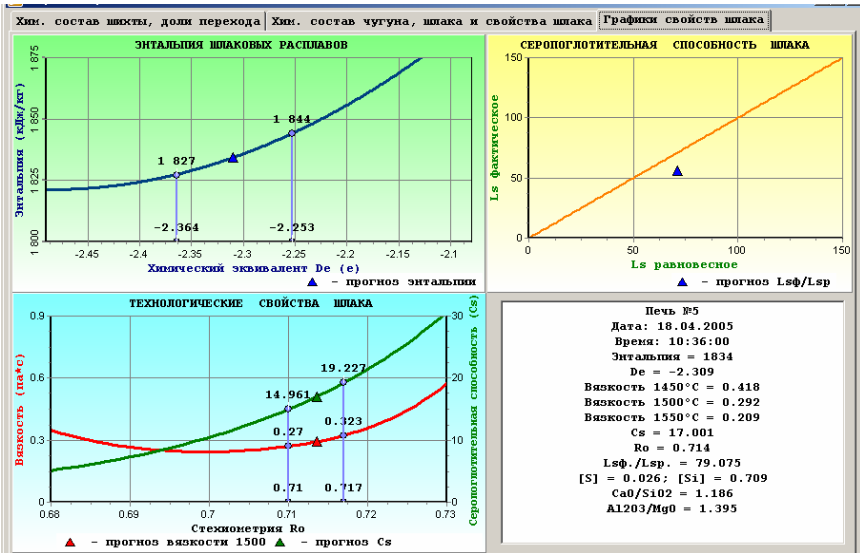


Рис. 4. Диалоговое окно автоматизированной системы «Шлак»

### Вариант 2. Изменение расхода железной руды.

В соответствии с табл.1 каждые 100 кг железной руды в подачу взамен агломерата МП уменьшают  $\rho$  на 0,0005, следовательно, уменьшение количества руды действует противоположным образом.

Для достижения  $\rho=0,715$  необходимо уменьшить количество железной руды в подаче на:

$$0,006 : 0,0005 \times 100 = 1200 \text{ кг} = 1,2 \text{ т.}$$

Следовательно, количество железной руды в подаче составит:  $1,5 - 1,2 = 0,3$  т. Соответственно количество агломерата МП составит:  $33,6 + 1,2 = 34,8$  т.

Выполненный расчет показал, что в результате такой корректировки следует ожидать получение чугуна с [S]=0,025 и шлака с основностью  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,204$ , стехиометрией  $\rho=0,716$  и вязкостью  $\eta_{1500} = 0,311$  Па·с, который попадает в середину интервала качества (рис.5).

Аналогичным образом могут быть рассчитаны и другие варианты в соответствии с табл.1.

Таблица 1. Факторы влияния количества и состава компонентов доменной шихты на показатели конечного шлака ДЦ№5.

Показатель	На 1% окатышей взамен агломерата МП	На 100 кг известняка взамен агломерата МП	На 100 кг руды железной взамен агломерата МП	На 0,01 СаО/SiO <sub>2</sub> агломерата МП	На 1% агломерата ГОК взамен МП	На 100 кг доломитиз. известняка взамен обычного	На 1% золы кокса	На 100 кг кокса	На 0,1% MgO в агломерате МП
Диапазон	0-30%	0,5-2,0 т	0-1,2 т	1,011-1,35	0-30 %	0-0,8 т	10,8-12,6%	13,6-15,4 т	0,81-1,31%
СаО/SiO <sub>2</sub> шихты	-0,0055	+0,0079	-0,00475	+0,0088	+0,0011	-0,00112	-0,0094	-0,00083	0
СаО/SiO <sub>2</sub> шлака	-0,006	+0,0086	-0,00525	+0,0096	+0,0011	-0,00125	-0,0105	-0,00089	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /MgO шлака	+0,002	-0,0005	+0,00017	0	+0,0001	-0,0224	+0,045	+0,0038	-0,162
Δе шлака	-0,0048	+0,0071	-0,00417	+0,0073	+0,0011	-0,00325	-0,0056	-0,00039	-0,0128
р шлака	-0,00057	+0,00073	-0,00005	+0,0008	+0,00007	0	-0,0011	-	+0,001
Cs шлака	-0,24	+0,4	-0,25	+0,53	+0,057	+0,00325	-0,56	-0,044	+0,6

Таблица 2. Химический состав загружаемой шихты.

Наименование	Вес, т	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	S	Fe	FeO	Fe <sub>мет.</sub>	Влага
Кокс	14,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,4	0,00	0,00	0,00	4,0
Зола кокса	1,61	43,20	25,00	3,85	1,45	0,70	0,00	12,10	0,00	0,00	0,0
Агл-т МП	33,6	8,77	1,30	9,92	1,61	0,37	0,037	55,26	15,61	0,00	0,0
Агл-т ГОК1	22,4	9,15	1,30	12,00	1,05	0,14	0,037	54,12	13,00	0,00	0,0
Руда желез.	1,50	33,90	0,80	0,30	0,51	0,00	0,031	39,48	0,00	0,00	3,5
Известняк	0,50	1,75	2,12	53,10	0,60	0,00	0,030	0,80	0,00	0,00	2,4
Антрацит	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,49	0,00	0,00	0,00	4,0
Шлак об.Восход	1,60	14,30	4,00	24,20	5,00	4,30	0,08	40,50	12,80	0,00	0,0
Всего (тонн)	6,23	1,19	6,53	0,86	0,23		0,23	31,12	8,24	0,0	
Всего (%)	10,59	2,02	11,1	1,46	0,3		0,38	52,89	14,01	0,0	

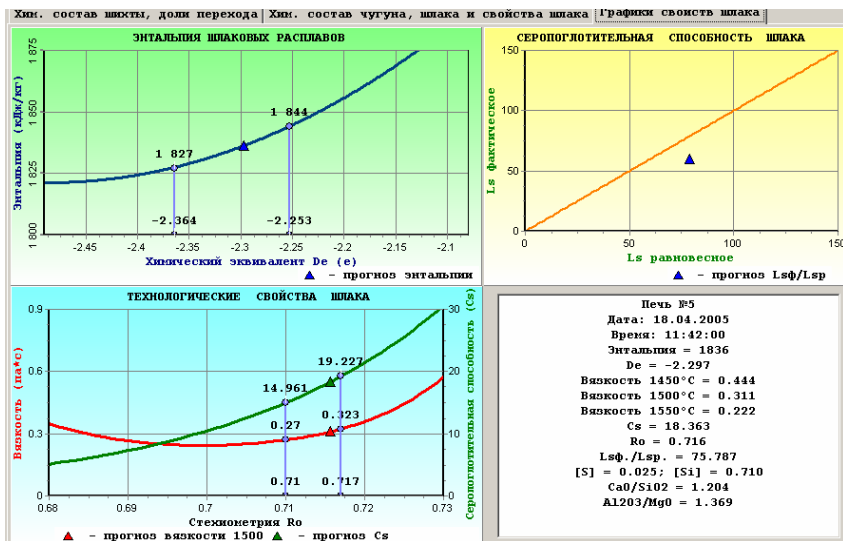


Рис. 5. Диалоговое окно автоматизированной системы «Шлак»

**Выводы.** Таким образом, разработанная система «Шлак» позволяет корректировать состав подачи, обеспечивающей выплавку чугуна заданного качества благодаря стабилизации технологических свойств шлага в указанных «интервалах качества». Эффективность системы предопределяется точностью входных данных, а также своевременностью расчетов.

1. Жмойдин Г.И., Куликов И.С. Серопоглощающая способность расплавов силикатов и алюмосиликатов кальция //Процессы восстановления и плавления железа. Сб. трудов Имет им.А.А.Байкова. -М.: Наука. -1965. -С.62-74.
2. Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Г., Михалевич А.Г. и др. Свойства жидких доменных шлаков. -М.: Металлургия. -1975. -184 с.
3. Приходько Э.В., Хамхотко А.Ф., Тогобицкая Д.Н. Строение и физико-химические свойства металлургических шлаковых расплавов //Экспресс-информация, ин-т «Черметинформация». -М. -1983. -21 с.
4. Залкинд И.Я., Троянкин Ю.В. Огнеупоры и шлаки в металлургии. -М.: Металлургиздат. -1964. -288 с.
5. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С. Металлургия чугуна. -М.: Металлургия. -1978. -480 с.
6. Остроухов М.Я., Шпарбер Л.Я. Эксплуатация доменных печей. -М.: Металлургия. -1975. -264 с.

Статья рекомендована к печати д.т.н. Э.В.Приходько