

Днепродзержинский государственный технический университет  
\*ПАО «Днепроровский металлургический комбинат»

## ПЛАВКОСТЬ ШЛАКА И НАГРЕВ ЧУГУНА ПРИ ВДУВАНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ

**Введение.** На ряде доменных печей Украины переход на вдувание пылеугольного топлива (ПУТ) сопровождался существенным снижением физического нагрева чугуна, что отрицательно отразилось на последующем переделе. Первой, наиболее вероятной причиной этого снижения может быть изменение шлакового режима в сторону образования легкоплавких шлаков с хорошей текучестью. В свою очередь изменение шлакового режима при вдувании ПУТ было продиктовано двумя обстоятельствами.

Первое из этих обстоятельств связано с особенностями теоретического подхода к технологии вдувания ПУТ. Так, согласно теории компенсации отрицательного воздействия угольной пыли на некоторые процессы доменной плавки [1] компенсационным ресурсом является снижение основности шлака. Действительно, снижение температур плавления и плавкости шлаков, обусловленное уменьшением основности, является положительным фактором, улучшающим подвижность расплавов в коксовой насадке.

Второе обстоятельство вызвано стремлением технологов улучшить сырьевые условия плавки при вдувании ПУТ. Это касается, прежде всего, качества кокса, содержание серы в котором во многом определяет эффективность и результативность доменной плавки. Если содержание серы в коксе снижается, то отпадает необходимость работы на шлаках повышенных основности и обессеривающей способности.

Одним из важных свойств шлака является плавкость, определяемая количеством тепла, необходимого для расплавления 1 кг шлака. Это свойство шлака влияет на расход топлива и температуру горна [2]. В свою очередь от температуры горна зависит физический и химический нагревы чугуна, имеющие значение при последующей переработке в сталь. Представляет интерес выяснить, в какой мере изменения шлакового режима при вдувании ПУТ отразились на плавкости шлаков и температуре чугуна.

**Постановка задачи.** Целью настоящего исследования есть количественная оценка изменения плавкости шлаков при переходе на технологию плавки с вдуванием ПУТ в конкретных сырьевых и эксплуатационных условиях.

*Методика и условия исследований.* Изучение плавкости шлаков при изменениях в технологии доменной плавки, обусловленных применением различных заменителей кокса, проводили на доменной печи «В» Днепровского металлургического комбината.

Доменная печь «В» с диаметром горна 8,2 м отличается от типового проекта высотой горна 3400 мм против 3200 мм, высотой зумпфа 1100 мм против 450 мм. Количество воздушных фурм увеличено с 16 до 18. Печь оснащена двумя чугунными летками и типовым двухконусным засыпным аппаратом.

Показатели качества кокса и работы доменной печи в базовый и опытный периоды представлены в табл.1 и 2. При переходе на технологию плавки с вдуванием ПУТ использовали кокс с улучшенными металлургическими характеристиками (табл.1).

Для оценки изменения плавкости шлаков использовали трехосную диаграмму Гиббса, более конкретно диаграммы Г.Гау и Л.Бабю, а также В.Г.Воскобойникова [3, 4]. С этой целью произвели перерасчет реальных доменных шлаков на 100% для системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Энтальпию шлака определяли по формуле [4]:

$$Q = m \cdot c \cdot t,$$

где  $Q$  – энтальпия шлака, кДж/кг;

$m$  – масса, кг;

$c$  – средняя удельная теплоемкость в интервале температур от 20°C до  $t$ ;

$t$  – температура, для которой определена энтальпия.

Таблица 1 – Качество кокса на доменной печи «В» Днепровского металлургического комбината в периоды исследований

Периоды	Технический анализ, %			Показатели качества, %	
	Зола	Сера	Влага	CRI	CSR
Базовый 01-30.01.2014	10,8	0,76	4,3	35,0	50,0
Опытный 01-31.05.2015	10,4	0,62	2,8	30,4	57,4

Таблица 2 – Показатели работы доменной печи «В» Днепровского металлургического комбината в исследуемые периоды

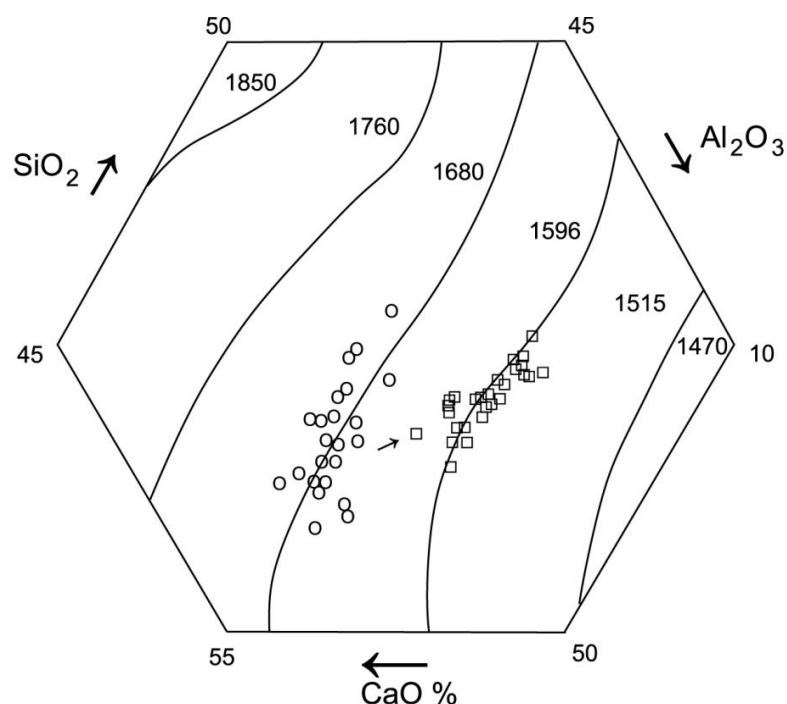
Показатели	Периоды	
	Базовый 01-31.01.2014	Опытный 01-31.05.2015
1	2	3
Производительность, %	100	115
Рудная нагрузка т/т кокса	3,12	4,71
Расход, кг/т чугуна:		
агломерата	1779	1742
окатышей	6	-
брикетов БЖС-Д	-	12
шлака конвертерного	-	8
известняка	-	21
кокса	559	400
антрацита	17	-
ПУТ	-	156
Дутьё:		
температура, °С	744	962
расход природного газа:		
% к дутью	0,65	-
м <sup>3</sup> /т чугуна	12,4	-
концентрация O <sub>2</sub> , %	20,8	24,6
Давление газа на колошнике (избыточное), кПа	128	126
Перепад давлений фурмы – колошник, кПа	111	116
Чугун:		
содержание, %:		
Si	0,74	0,63
Mn	0,24	0,11
S	0,026	0,019
P	0,100	0,078
температура, °С	1479	1450

Продолжение таблицы 2

1	2	3
Шлак:		
содержание, %:		
CaO	47,6	45,5
SiO <sub>2</sub>	39,4	40,5
MgO	5,0	6,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,5	6,3
S	1,37	1,2
MnO	0,27	0,15
FeO	0,37	0,33
основность :		
CaO/SiO <sub>2</sub>	1,21	1,12
CaO+MgO/SiO <sub>2</sub>	1,34	1,27
Выход, кг/т чугуна	390	379
Коэффициент распределения серы L <sub>s</sub>	59,8	58,9

Удельную теплоемкость шлака (для диапазона температур 1350-1600°C) определяли по формуле В.Г.Воскобойникова:

$$C_{20}^t = 0,63 \cdot 10^{-2} \cdot t - 2,0 \cdot 10^{-6} t^2 - 3,67 + 0,067 \cdot \left(1 - \frac{CaO}{\Sigma \text{оксидов}}\right), \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$



○ – шлаки основностью 1,21, период работы 01.01-31.01.2014;  
 □ – шлаки основностью 1,12, период работы 01.05-30.05.2015;  
 → – направление изменения плавкости шлаков;  
 цифры у кривых изокалей – плавкость, кДж/кг

Рисунок 1 – Участок диаграммы плавкости шлаков в системе CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Значение энтальпии определяли для нижнего шлака с температурой  $t = t_y + 25$ , где  $t_y$  – инструментально определенная температура чугуна на выпуске; 25 – принятый перегрев нижнего шлака по сравнению с температурой чугуна.

Длительность сравниваемых периодов – один календарный месяц, продолжительность единичного периода (одна фигуративная точка на диаграммах) – одни сутки.

**Результаты работы.** На рис.1 приведен фрагмент диаграммы плавкости шлаков в системе CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с нанесением фигуративных точек, отражающих расчетные составы шлака в исследуемые периоды. Из диаграм-

мы видно, что переход на вдувание ПУТ с изменением шлакового режима вызвал смещение поля фигуративных точек с изокалы 1680 кДж/кг на изокалы 1596 кДж/кг, что в среднем примерно на 5% меньше исходного расхода тепла на расплавление шлаков базового периода. Указанная разница в затратах тепла является в полнее ощутимой для теплового баланса нижней высокотемпературной зоны доменной печи.

Изменение шлакового режима в базовом периоде характеризовалось существенным снижением основности –  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  уменьшилось с 1,21 до 1,12 и увеличением содержания магнезии с 5,0 до 6,1%. Улучшение текучести шлака и увеличение концентрации в нем  $\text{MgO}$  обусловили вполне приемлемый уровень десульфурации чугуна – коэффициент распределения серы составил 58,9 против 59,8 в базовом периоде при существенно большей основности шлака.

Для оценки поведения расплавов в коксовой насадке важное значение имеет удельный расход тепла на сообщение шлаку хорошей текучести, так как не всегда шлак, имея низкую температуру плавления, становится подвижным при пониженных температурах.

Информация, приведенная на рис.2, свидетельствует о том, что перегрев шлаков до нормальной текучести в опытный период снизился. Если в базовом периоде поле фигуративных точек на диаграмме находилось между изокалами 1890 кДж/кг и 1680 кДж/кг, то при использовании ПУТ перегрев шлаков до нормальной текучести снизился до 1680 кДж/кг и существенно ниже.

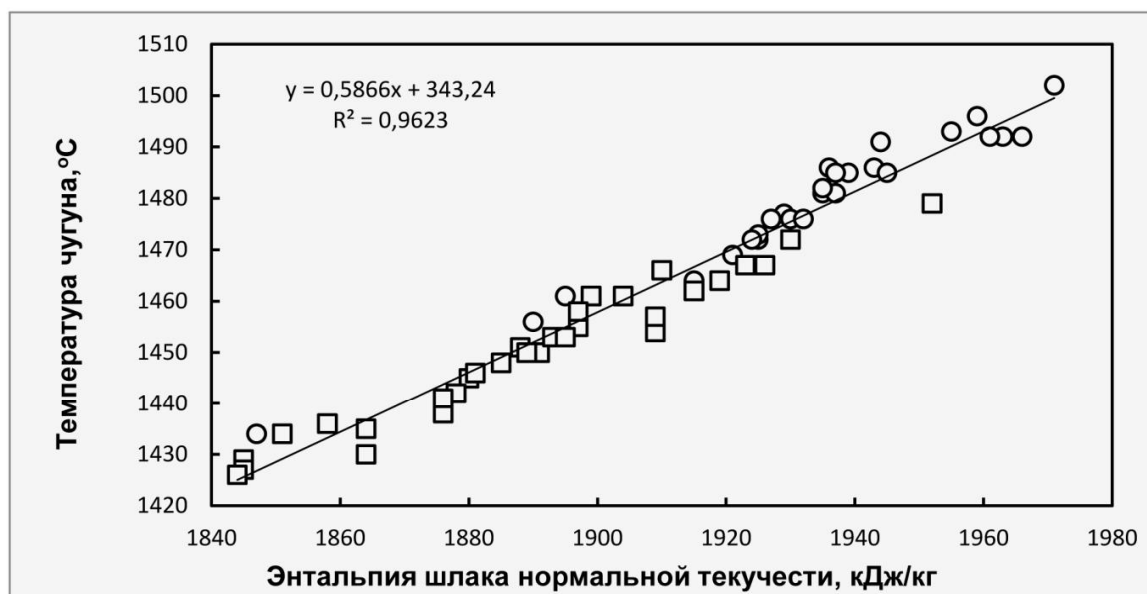
Уменьшение выхода шлака и перегрева его до нормальной текучести вызвало снижение прихода тепла в горн с 733,2 МДж/кг до 697,36 МДж/кг. В соответствии с этим снизились физический и химический нагревы чугуна соответственно с 1479 до 1450°C и с 0,74 до 0,63% Si. Причем, несмотря на улучшение условий восстановления кремния (некоторое снижение давления газа в рабочем пространстве печи и уменьшение основности шлака), концентрация кремния в металле снизилась. Факторами, определяющими степень перехода кремния в чугун, оказались приход тепла в горн и вдувание холодной угольной пыли.

Поскольку энтальпию шлака нормальной текучести рассчитывали на основе данных о температуре чугуна, то связь между указанными показателями была близкой

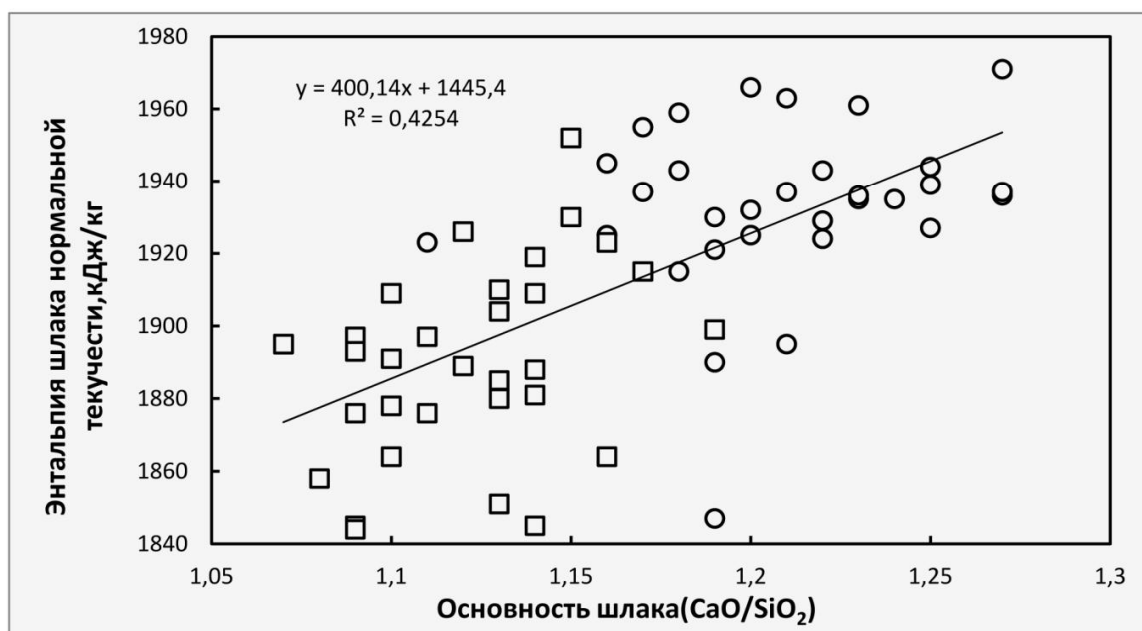
→ – направление изменения энтальпии шлаков, обеспечивающей нормальную текучесть расплава; цифры у кривых изокалей – энтальпия шлаков при нормальной текучести, кДж/кг; остальные обозначения те же, что и на рис.1

к функциональной (рис.3, а). Объединяя расчетные данные по теплосодержанию шлаков нормальной текучести для базового и опытного периодов, получили значимую связь между основностью шлака и этим теплосодержанием (рис.3, б). Было установлено, что в исследованном диапазоне колеблемости основности шлака ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,07\text{-}1,27$ ) на каждые 0,1 ед. изменения основности прямо пропорционально меняется энтальпия шлака – в среднем на 44 кДж/кг. Эта величина составляет 2,4% от минимального значения энтальпии в массиве данных и 2,3% от максимального значения.

(а)



(б)



обозначения те же, что и на рис.1

Рисунок 3 – Влияние энтальпии нормальной текучести на температуру чугуна (а) и основности шлака на энтальпию обеспечения нормальной текучести (б)

**Выводы.** Показано, что изменение шлакового режима в сторону уменьшения основности при вдувании в горн доменной печи пылеугольного топлива сопровождается снижением плавкости шлаков, снижением уровня перегрева шлаков до обеспечения нормальной текучести. Это изменение приводит к уменьшению прихода тепла в горн и является предпосылкой снижения нагрева чугуна в горне и на выпуске. Поэтому мнение о целесообразности использования сниженной основности шлака в качестве компенсирующего ресурса при вдувании ПУТ нуждается в корректировке.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ярошевский С.Л. Пылеугольное топливо – реальная и эффективная альтернатива природному газу в металлургии / Ярошевский С.Л. // Металл и литье Украины. – 2006. – №3. – С.15-20.
2. Плискановский С.Т. Оборудование и эксплуатация доменных печей: учебник / Плискановский С.Т., Полтавец В.В. – Днепропетровск: Пороги. – 2004. – 496с.
3. Металлургия чугуна / Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н. [и др.]; под ред. Ю.С.Юсфина. – [3-е изд., перераб. и дополн.]. – М.: ИКЦ «Академ-книга». – 2004. – 774с.
4. Свойства жидких доменных шлаков / Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михалевич А.Г. [и др.]. – М.: Металлургия. – 1975. – 184с.

*Поступила в редколлегию 10.05.2016.*

УДК 504.064.4: 669.181.28

НЕВЕДОМСКИЙ В.А.\*, канд. техн. наук  
ЧЕРНЫШОВ А.В., ст. преподаватель  
ЧЕРНЫШОВ А.А.\*\*, инженер 1-й категории  
ГУБСКАЯ Т.А., студент

Днепродзержинский государственный технический университет

\*ООО «ТехноСКАРМ», г. Никополь

\*\*ПАО «Днепровский металлургический комбинат»

#### ПРИНЦИП «ZERO WASTE» ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ШЛАКОВ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Введение.** Выход шлаков ферросплавного производства на территории стран СНГ превышает 3,5 млн. т в год, в том числе на предприятиях Украины приближается к 0,9 млн. т в год. Затвердевшие шлаки дробят, сортируют, перерабатывают на щебень и песок для дорожного строительства. Жидкие шлаки подвергают грануляции и используют в строительстве и собственном производстве как сырьевые материалы. По химическому составу шлаки товарного силикомарганца представляют собой насыщенный по кремнезему расплав сложного состава, который может быть отнесен к системе  $\text{SiO}_2 - \text{MnO} - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Na},\text{K})_2\text{O}$ . Среднестатистическое содержание компонентов в шлаках силикомарганца ПАО „Никопольский завод ферросплавов“ составило: 50,56%  $\text{SiO}_2$ , 14,9%  $\text{CaO}$ , 4,39%  $\text{MgO}$ , 15,12  $\text{MnO}$ ; пределы содержаний остальных компонентов: 1,7-10,5%  $(\text{Na},\text{K})_2\text{O}$ , 8-10%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 2-3%  $\text{FeO}$ , 0,6-1,2%  $\text{S}^{2-}$ . Среднеквадратичное отклонение при статистической обработке около 1300 серийных рентгеноспектральных анализов составляло (мас.%) 0,29  $\text{SiO}_2$ , 1,34  $\text{CaO}$ , 0,55  $\text{MgO}$ , 1,65  $\text{MnO}$ . Минеральная составляющая продуктов переработки используется для устройства оснований дорожных одежд, служит инертным наполнителем для закладки в горные выработки. Металлопродукт, извлеченный из отвального шлака, направляется на переплав [1].