

## РОЗДІЛ «МЕТАЛУРГІЯ»

УДК 669.162

ЛЕБЕДЬ Ю.К., инженер-технолог  
КРЯЧКО Г.Ю.\* , к.т.н., доцент

ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат»

\*Днепропетровский государственный технический университет, г. Камянское

**ВЛИЯНИЕ ВЫХОДА ШЛАКА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
И РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ**

**Введение.** Количеству (выходу) шлака как параметру шлакового режима, в известной мере, определяющему расход кокса и производительность доменной печи, уделялось существенное внимание и в прошлом [1, 2], и в настоящем [3, 4] времени, причем количественные оценки влияния выхода шлака на удельный расход кокса, принятые на протяжении активного развития теории и технологии доменного процесса, различались весьма существенно.

Так Банзен [1], опираясь на опыт доменной плавки 20 годов XX века, оценивал влияние изменения удельного выхода шлака ( $\pm 100$  кг/т чугуна) на такой же расход кокса в  $\pm 13$  кг.

А.Н.Рамм в фундаментальном справочнике [1] указал бóльшую величину воздействия изменения количества шлака на удельный расход кокса  $\pm 18 \div 27$  кг на  $\pm 100$  кг шлака с оговоркой, что меньшее значение относится к выплавке передельных чугунов на высоконагретом дутье. Эти цифры получены А.Н.Раммом, исходя из определения расхода кокса на плавление шлака:

$$\frac{\Delta k}{\Delta U} = \frac{Q_{ш}}{\bar{q}_{кф}}, \text{ кг кокса / кг шлака,}$$

где  $\Delta k$ ,  $\Delta U$  – изменения расхода кокса и выхода шлака;

$Q_{ш}$  – теплосодержание шлака, кДж/кг;

$\bar{q}_{кф}$  – тепловой эквивалент кокса, кДж/кг.

Влияние относительной массы шлака оценено при изменении  $Q_{ш}$  в пределах  $1760 \div 2000$  кДж/кг и  $\bar{q}_{кф}$  в пределах  $7500 \div 10000$  кДж/кг.

Было также отмечено, что указанная выше величина ( $+18 \div 27$  кг кокса / 100 кг шлака) не включала повышение расхода кокса, связанного с увеличением расхода сырого флюса. Иными словами допускалось более существенное влияние количества шлака на эффективность плавки.

В справочнике 1969 г. издания [2] влияние выхода шлака на расход кокса оценивалось уже в  $\pm 46$  кг кокса/т чугуна при изменении удельного выхода шлака  $\pm 100$  кг. Кстати в этом справочнике оценено и влияние выхода шлака на производительность печи: рост производительности на 5% при уменьшении выхода шлака на 100 кг/т чугуна.

В справочном издании 1986 г. [5] оценка влияния выхода шлака на показатели плавки отсутствует. Как альтернатива этому отсутствию приводятся нормативные данные влияния содержания железа в рудной сыпи на расход кокса и производительность печей.

И.Г.Товаровский в монографии [6] приводит данные об относительной зависимости показателей плавки от снижения количества шлака. Согласно этим данным снижение выхода шлака (обусловленное повышением содержания железа в шихте) на каждые 10 кг/т приводит к уменьшению расхода кокса на 0,35% и повышению производи-

тельности на 0,6%. В соответствии с приведенными данными абсолютная величина экономии кокса от уменьшения выхода шлака будет зависеть от расхода кокса. Так при расходе кокса 500 кг/т чугуна снижение выхода шлака на 10 кг/т чугуна обеспечит снижение расхода кокса на 1,75 кг/т чугуна, что почти совпадает с коэффициентом А.Н.Рамма на передельный чугун (1,8 кг/т). Если же будет достигнут расход кокса 200 кг/т чугуна, то коэффициент влияния выхода шлака снизится до 0,7 кг/т при изменении выхода шлака на 10 кг/т чугуна.

Особое значение вопрос о влиянии выхода шлака на показатели плавки и работу печи в целом приобрел при повсеместном переходе доменных печей от вдувания природного газа на пылеугольное топливо.

В работе [3] в качестве определяющего компонента, превышение определенного уровня которого невозможно в реальных сложившихся условиях, принят удельный выход шлака, приходящийся на единицу массы израсходованной в доменной плавке кокса. На основе статистической оценки показателей работы доменных печей разных регионов мира сделан вывод о том, что при достигнутых уровне качества кокса, железорудного сырья, параметрах температурно-дутьевого режима в диапазоне расхода кокса от 250 до 600 кг/т чугуна маловероятна возможность выхода шлака более 1000 кг/т кокса. Необходимо отметить, что продолжительность единичных периодов в исследовании [3] составила один календарный год. Сглаживающее влияние такой продолжительности не позволяет оценить действительные величины размаха колебаний показателей, наблюдаемых при сокращении периодов усреднения.

**Постановка задачи.** Задачей настоящей работы является современная оценка влияния удельного выхода шлака на расход кокса, определяющего эффективность доменной плавки и производительность, являющуюся мерой результативности процесса.

**Результаты работы.** Исследовали работу доменной печи ПАО «ДМК» с диаметром горна 8,4 м, оснащенной двухконусным засыпным аппаратом. В период исследований с 20.04.2015 по 18.12.2015 года печь работала на местном агломерате с содержанием железа в среднем 55,8% и коксе различной поставки с содержанием золы 10,8% и серы 0,75%. В качестве топливной добавки использовали пылеугольное топливо со средним за период расходом 149 кг/т чугуна. Показатели работы печи в опытном периоде приведены в табл.1.

Таблица 1 – Показатели работы печи в период с 20.04.15 г. по 18.12.2015 г.\*

Показатель	Значения показателей		
	среднее	минимум	максимум
Дутье:			
давление избыточное, кПа	270	227	288
температура, °С	955	866	1056
влажность, г/м <sup>3</sup>	15,1	6,9	25,8
содержание кислорода, %	24,18	22,53	25,21
Газовый режим, кПа:			
давление на колошнике избыточное	131	98	140
перепад давлений общий	139	120	153
Содержание кремния в чугуне, %	0,49	0,15	0,86
Шлак:			
Основность CaO/SiO <sub>2</sub>	1,07	1,05	1,10
выход, кг/т чугуна	421	366	512

\* – за вычетом суток с простоями.

На рис.1 приведены данные статистической обработки исследованного массива. В качественном аспекте график (рис.1, а) вполне отвечает известному постулату о прямом влиянии выхода шлака на удельный расход кокса. Однако в количественном выражении это влияние превышает известные значения [1, 2].

Анализ показал, что расход кокса и топлива (кокс + ПУТ) при изменении выхода шлака на 100 кг/т чугуна изменялся примерно на одинаковую величину – 53 кг для кокса (рис.1, а) и 54 кг для топлива (рис.1, б). На такую же величину относительного количества шлака (100 кг/т чугуна) интенсивность плавки по суммарному углероду изменялась примерно на 10% (рис.1, в).

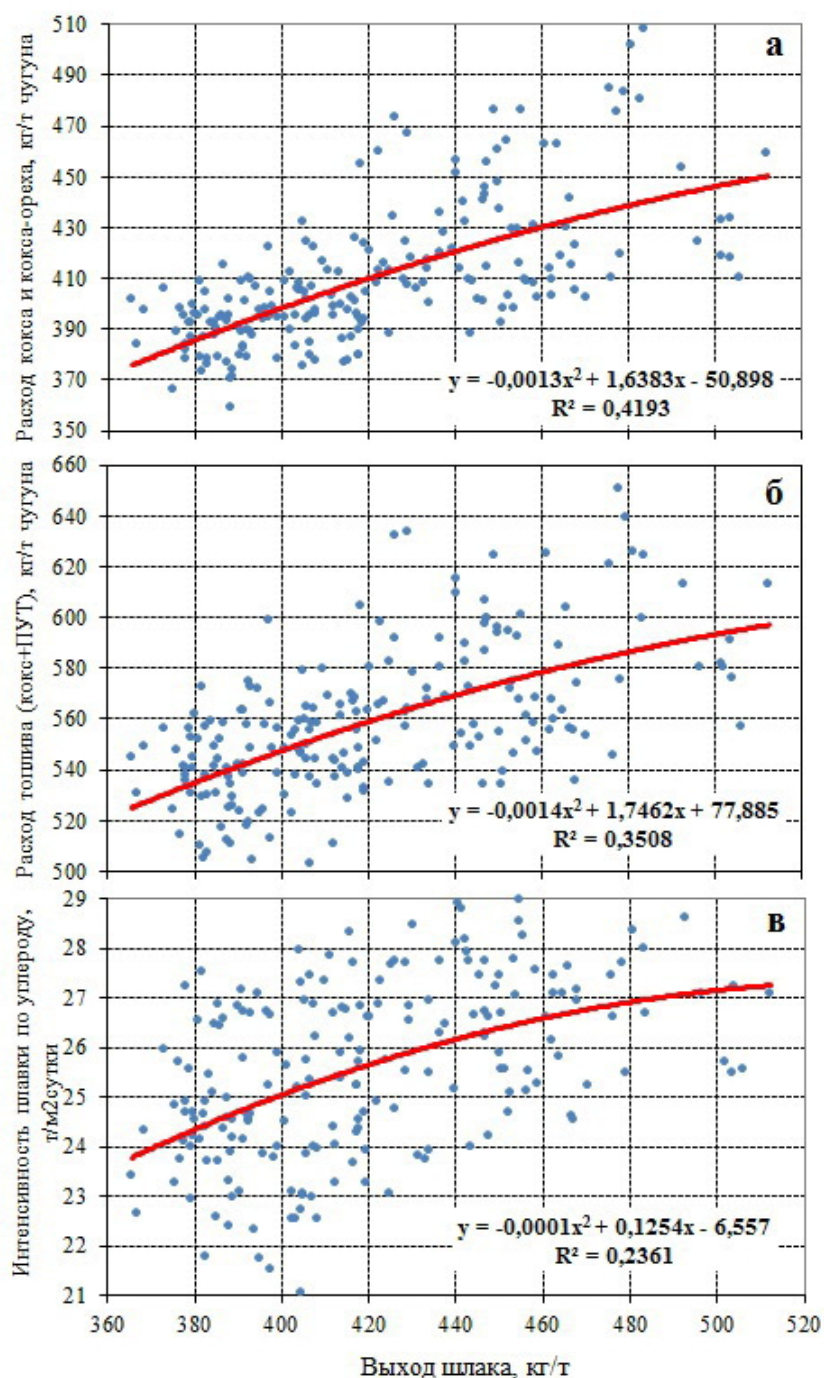


Рисунок 1 – Влияние выхода шлака на удельные расходы кокса (а), топлива (б) и интенсивность плавки по суммарному углероду (в)

С увеличением выхода шлака интенсивность плавки возрастала (рис.1, в) и наоборот снижалась с уменьшением. Обнаруженную закономерность можно объяснить значительными структурными изменениями в столбе шихты, вызванными изменениями богатства железорудного сырья и, соответственно, выхода шлака. Известно [7], что изменение интенсивности плавки вызывает определенные изменения в удельном расходе кокса и производительности печи.

Принимая во внимание количественное влияние интенсивности плавки на удельный расход кокса (+1% интенсивности → +3,5 кг/т чугуна), установленное в работе [6], нетрудно оценить непосредственное влияние выхода шлака на эффективность плавки. Если учесть количественное влияние интенсивности плавки на расход кокса 35 кг/т чугуна на 10% ее изменения, то разница, приходящаяся на влияние выхода шлака, составит 53 (54) – 35 = 18 (19) кг/т чугуна. Этот результат, основанный на практических данных о работе промышленной печи, совпал с теоретической оценкой А.Н.Рамма [1].

Необходимо отметить также и то, что величина значения корреляционного отношения взаимосвязи рассмотренных факторов монотонно снижалась от рис.1, а до рис.1, в. Это явление можно объяснить последовательным наложением воздействия различных неучтенных факторов, таких как газификация ПУТ, влажность дутья, содержание кислорода в дутье и другие.

Следует отметить, что связи между относительным выходом шлака и производительностью не обнаружено ( $R^2 = 0,009$ ). При этом имеется тенденция к снижению интенсивности плавки по железорудной сыпи  $I_p$  при уменьшении выхода шлака  $Q_{ш}$ : ( $I_p = -0,0002 \cdot Q_{ш}^2 + 0,2547 \cdot Q_{ш} + 29,305$ , т/м<sup>2</sup> · сутки;  $R^2 = 0,1018$ ).

Рассмотрение зависимости между удельным расходом кокса и удельным выходом шлака, отнесенным к единице массы использованного в доменной плавке кокса (рис.2), дает возможность заключить следующее.

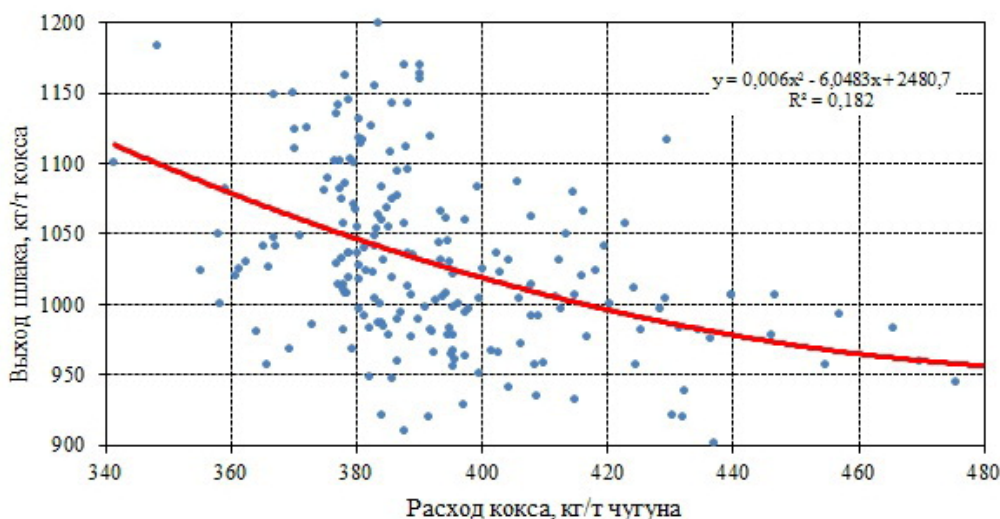


Рисунок 2 – Данные о взаимосвязи удельных расходов кокса и выхода шлака

Во-первых, наблюдается значительный размах колеблемости выхода шлака при одинаковом расходе кокса, о чем свидетельствует график и низкое корреляционное отношение. Величина этого размаха наибольшая при пониженных для данной выборки значениях расхода кокса 360-390 кг/т чугуна, что составляет ~ 200 кг/т кокса. Такую же величину размаха колебаний выхода шлака при одинаковом расходе шлака обнаружили в работе [3], анализируя показатели работы доменных печей США в 2007 г. В той же

работе размах изменения выхода шлака на печах бывшего СССР (1989 г.) составил примерно 300 кг/т кокса, а на печах Европы (2002-2004 г.г.) – 400 кг/т кокса.

Во-вторых, в исследованном диапазоне изменения расхода кокса, а он находится в пределах исследованного в работе [3], установлено, что примерно половина единичных периодов выборки отвечает шлаковому соотношению  $> 1000$  кг/т кокса. Поэтому с утверждением о том, что достижение выхода шлака больше 1000 кг/т кокса является маловероятным, согласиться нельзя. Основываясь на результатах настоящего исследования, можно отодвинуть границу маловероятного выхода шлака до 1150-1200 кг/т кокса, хотя работа коксовой насадки в режиме орошения шлаком более 1000 кг/т кокса может быть проблематичной.

**Выводы.** Установлено, что в исследованных условиях плавки и диапазоне выхода шлака расход кокса и суммарного топлива (кокс + ПУТ) возрастали в среднем на 5,3-5,4 кг/т чугуна при увеличении выхода шлака на 10 кг/т чугуна. Показано также, что в этой относительной величине перерасхода кокса и топлива кроме затрат на расплавление и перегрев дополнительной массы шлака имеется составляющая, обусловленная изменением интенсивности плавки. Учет влияния этой составляющей позволил оценить влияние выхода шлака на расход кокса в размере  $+ 1,8 \div 1,9$  кг/т чугуна на каждые дополнительные 10 кг/т шлака на тонну чугуна, что соответствует теоретической оценке А.Н.Рамма.

Связи между относительным выходом шлака и производительностью не установлено. Отмечена тенденция к снижению эффективности плавки по железорудной сыпи при уменьшении выхода шлака.

При рассмотрении зависимости удельных выхода шлака и расхода кокса установлено, что в сложившихся реальных технологических условиях возможно достижение выхода шлака до 1150-1200 кг/т кокса. Разумеется, при таком напряженном шлаковом режиме требования к организации зоны когезии, коксовой зоны и качеству кокса в частности должны быть существенно выше.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Доменное производство: справочник. Том 1 / под ред. акад. И.П.Бардина. – М.: Металлургиздат, 1963. – 648с.
2. Федоровский Н.В. Спутник металлурга / Федоровский Н.В., Рутковский Г.Я., Астахов А.Г. – К.: Техніка, 1969. – 222с.
3. Ресурсы и эффективность полной и комплексной компенсации при использовании пылеугольного топлива в доменной плавке / С.Л.Ярошевский, А.В.Емченко, В.Е.Попов [и др.] // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2010. – № 7. – С.40-49.
4. О плотности орошения продуктами плавки коксовой насадки доменной печи / В.П.Пузанов, Г.А.Нечкин, О.П.Онорин [и др.] // Сталь. – 2012. – № 4. – С.6-15.
5. Технолог-доменщик / Ю.П.Волков, Л.Я.Шпарбер, А.К.Гусаров // М.: Металлургия, 1986. – 263с.
6. Товаровський Й.Г. Доменна плавка. Еволюція, хід процесів, проблеми та перспективи / Товаровський Й.Г. – Дніпропетровськ: Пороги, 2003. – 596с.
7. Влияние интенсивности доменной плавки на удельный расход кокса и производительность печи / А.Л.Берин, А.И.Парфенов, Е.А.Вербенко [и др.] / Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема: тематический отраслевой сборник. – М.: Металлургия. – 1979. – № 5. – С.40-45.

Поступила в редколлегию 06.03.2017.