

*к.т.н., доц. Кузин А.В.,
д.т.н., проф. Ярошевский С.Л.
(ДонНТУ, г. Донецк, Украина),
ассистент Ковальчик Р.В.,
д.т.н., проф. Томаш А.А.
(ЛГТУ, г. Мариуполь, Украина)*

ОЦЕНКА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА КОКСА И ПОРОЗНОСТИ В НИЖНЕЙ ЧАСТИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

В роботі розглянуто вплив гарячої міцності коксу на його гранулометричний склад в нижній частині доменної печі. Встановлено, що при зниженні гарячої міцності коксу в його складі збільшується вміст дрібних фракцій, 0 – 1 та 1 – 3 мм, зменшується частка крупних шматків, 10 – 25 та 25 – 40 мм, та значно знижується порозність коксової насадки.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Анализ исследований и публикаций.

Развитие черной металлургии в настоящее время характеризуется увеличением производства стали и, соответственно, чугуна. Для производства 1 т стали необходимо 700 - 800 кг жидкого чугуна, и его доля при выплавке стали неуклонно увеличивается [1, 2].

Современный уровень доменной технологии характеризуется содержанием в агломерате от 1 до 5 % мелочи крупностью 5 - 0 мм, практически полным выводом из состава доменной шихты сырого известняка и других флюсующих материалов, выходом шлака от 140 до 300 кг на 1 т чугуна, температурой дутья более 1100 °С, содержанием кислорода в дутье 23 - 32 %, давлением газа под колошником 150 - 250 кПа, применением низкочольного и низкосернистого пылеугольного топлива (ПУТ), основностью шлака от 1,05 до 1,15 при содержании MgO 8 - 12 %, что обеспечивает получение легкоплавкого устойчивого и однородного шлака при содержании серы в чугуне 0,02 - 0,05 % [1, 3, 4].

В последние 30-40 лет развитие доменной технологии осуществляется не только на основе улучшения качества железосодержащих материалов, но и кокса, а также применения дополнительных видов топлива – ПУТ, природного газа (ПГ) и мазута в сочетании с комплексом компенсирующих мероприятий [3, 5 - 7]. Так, на доменных печах фирмы НКК (Япония) и фирмы Shanghai Baosteel Group (Китай) среднего-

довой расход ПУТ превысил 200 кг/т чугуна, что позволило работать с расходом кокса ниже 300 кг/т чугуна при производительности выше 2,2 т/(м³·сутки) [8, 9].

В последнее десятилетие ПГ в Украине стал дорогостоящим энергоносителем и стоимость его возросла практически до стоимости кокса. Ввиду указанных выше причин внедрение технологии вдувания ПУТ в горн доменных печей в Украине становится весьма актуальным.

Для реализации современной технологии доменной плавки в Украине с вдуванием ПУТ необходимо обеспечить сохранение газопроницаемости столба шихтовых материалов и дренажную способность горна. Одним из важнейших факторов влияния на газопроницаемость является качество железорудных материалов. В настоящее время в Украине содержание железа в шихте доменных печей на 2 - 5 % ниже, а содержание мелочи в агломерате в 6 - 9 раз выше, чем за рубежом [10]. Другим фактором, ограничивающим применение ПУТ-технологии является качество кокса, и в первую очередь его гранулометрический состав.

Кокс выполняет в доменной печи ряд важнейших функций: топливо, восстановитель и разрыхлитель. Использование кокса в качестве топлива и восстановителя не требует его механической прочности и газопроницаемости насыпной массы. Функции разрыхлителя кокс преимущественно выполняет в нижних горизонтах доменной печи при высоких температурах, оставаясь твёрдым кусковым материалом, когда рудные материалы находятся в размягчённом состоянии и в виде расплава.

Благодаря газопроницаемости и дренажной способности коксовой насадки, в нижних горизонтах печи сохраняется возможность относительно свободного прохода газов. Выполнять функции разрыхлителя кокс может только при условии сохранения достаточной крупности кусков и значительного объёма межкусковых пустот в условиях высоких температур. Для сохранения крупности кусков кокс должен обладать высокой механической прочностью при нагревании в атмосфере печных газов, называемой горячей прочностью (*CSR*). Показателем *CSR* является выход фракции более 10 мм после разрушения в барабане кокса, подвергнутого высокотемпературной обработке при температуре 1100 °С в атмосфере CO₂ [11].

Постановка задачи.

Целью исследований явилась разработка методики анализа гранулометрического состава кокса в нижней части доменной печи на основе показателя его горячей прочности *CSR*.

Изложение материала и его результаты.

Для оценки газопроницаемости кокса в нижней части доменной печи необходимо предварительно определить его гранулометрический

состав в зависимости от горячей прочности. Систематизированные данные о фракционном составе кокса в нижней части доменной печи отсутствуют. Для предсказания гранулометрии кокса различной горячей прочности в горне и заплечиках можно воспользоваться описанием крупности частиц кускового материала на основе статистического распределения Вейбула (уравнения Розина – Раммлера) [12]

$$F(d) = 1 - \exp(-\lambda \cdot d^\beta), \quad (1)$$

где $F(d)$ - содержание частиц диаметром меньше d , доли единицы;
 d - диаметр частиц, мм;

β и λ - параметры статистического распределения.

Уравнение (1) позволяет определить весь гранулометрический состав и содержание каждой фракции, если известны β и λ . Для определения β и λ минимально необходимо две пары данных, т.е. содержание двух фракций. Показатель CSR характеризует содержание фракции +10 мм в условиях низа доменной печи. Таким образом, он дает первую пару значений. Например, CSR для ЯКХЗ по данным [13] составляет 36,3 % , тогда как содержание фракции -10 мм после нагрева составит $(100-36,3)/100=0,637$ доли единицы. Следовательно, $d_1 = 10$, а $F(d_1) = 0,637$. Принимаем, что в нижней части доменной печи в фурменном коксе после разрушения содержание класса +60 мм не превышает 1 %. Тогда содержание фракции -60 мм составляет 99 %. Вторая пара значений составит: $d_2 = 60$, $F(d_2) = 0,99$. Для определения коэффициентов β и λ произведем замену переменных в формуле (1), $X(d) = \ln d$ и $Y(d) = \ln \ln 1/(1 - F(d))$, приведя ее к линейному виду:

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(d)} = \ln \lambda + \beta \cdot \ln d, \quad (2)$$

$$Y(d) = \ln \lambda + \beta \cdot X(d). \quad (3)$$

С учетом указанных двух пар данных составим систему уравнений для определения β и λ :

$$\begin{cases} Y(d_1) = \ln \lambda + \beta \cdot \ln d_1 = \ln \lambda + \beta \cdot 10 \\ Y(d_2) = \ln \lambda + \beta \cdot \ln d_2 = \ln \lambda + \beta \cdot 60 \end{cases} \quad (4)$$

Для кокса с произвольной горячей прочностью CSR (доли единиц) справедливы соотношения

$$\begin{cases} Y(d_1) = \ln \ln \frac{1}{1-F(d_1)} = \ln \ln \frac{1}{CSR} \\ Y(d_2) = \ln \ln \frac{1}{1-F(d_2)} = \ln \ln \frac{1}{1-0,99} \end{cases} \quad (5)$$

Решая систему уравнений:

$$\begin{cases} \ln \ln \frac{1}{CSR} = \ln \lambda + \beta \cdot \ln 10 \\ \ln \ln \frac{1}{1-0,99} = \ln \lambda + \beta \cdot \ln 60 \end{cases} \quad (6)$$

определим коэффициенты β и λ , которые для кокса ЯКХЗ с $CSR = 0,363$ д.ед. соответственно равны $0,84494$ и $0,14482$. Подставив значения β и λ в формулу (1), получим уравнение, описывающее гранулометрический состав кокса ЯКХЗ в горне и заплечиках доменной печи:

$$F(d) = 1 - \exp(-0,14482 \cdot d^{0,84494}). \quad (7)$$

По данной методике было просчитано изменение фракционного состава кокса в нижней части доменной печи при изменении показателя CSR для следующих производителей: кокс ЯКХЗ, $CSR = 36,3 \%$; кокс «Северсталь», $CSR = 53,2 \%$; кокс алтайский, $CSR = 61,0 \%$; кокс фирмы «ВНП Steel», $CSR = 74,1 \%$ (рис. 1). Из рис. 1 видно, что содержание фракции 0-8 и 0-4 мм для кокса горячей прочности $CSR 74,1 \%$ составляет соответственно $19,2$ и $7,2 \%$. Результаты расчёта показывают достаточное сходство их с экспериментальными данными, представленными в работе [14]: содержание кокса фракции - 8 мм на уровне воздушных фурм составляет $16,5 \%$, а - 4 мм – $5,0 \%$. В результате статистической обработки расчётных данных об изменении гранулометрического состава кокса в нижней части доменной печи получено обобщающее уравнение Розина – Раммлера для кокса с произвольным значением показателя CSR :

$$F(d) = 1 - \exp\{-[0,000136(CSR)^2 - 0,0184(CSR) + 0,643]d^{0,0168(CSR) + 0,231}\}. \quad (8)$$

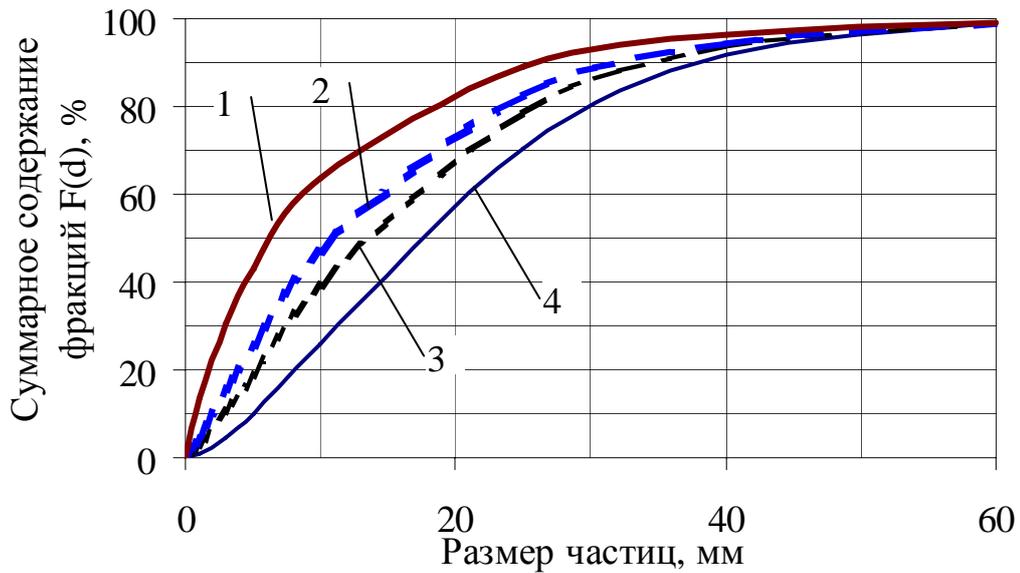


Рисунок 1- Графическое описание фракционного состава кокса на уровне воздушных фурм:
 1 - кокс ЯКХЗ, CSR 36,3%; 2 - кокс "Северсталь", CSR 53,2%;
 3 - Алтайкокс, CSR 60,0%; 4 - кокс "BHP Steel", CSR 74,1%

Гранулометрический состав кокса в горне и заплечиках в соответствии с уравнением (8) приведен на рис. 2. Увеличение показателя прочности CSR сопровождается снижением содержания в горновом коксе мелких частиц 0 – 1, 1 – 3 и 3 – 5 мм. Содержание фракции 5 – 10 мм мало меняется при увеличении горячей прочности кокса. В то же время количество относительно крупных кусков 10 – 25 и 25 – 40 мм значительно увеличивается по мере повышения прочности после реакции.

Основной характеристикой газопроницаемости кокса является порозность, т.е. доля межкусковых пустот в общем объеме слоя. Порозность коксовой насадки в нижней части доменной печи рассчитывали по формуле [15]

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_k - g \cdot \left[1 - \left(\frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k \cdot \Phi_{2/3}^k} \right) \cdot \left(\frac{d_m}{d_k} \right) \right]}{1 - g \cdot \left[1 - \left(\frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k \cdot \Phi_{2/3}^k} \right) \cdot \left(\frac{d_m}{d_k} \right) \right]}, \quad (9)$$

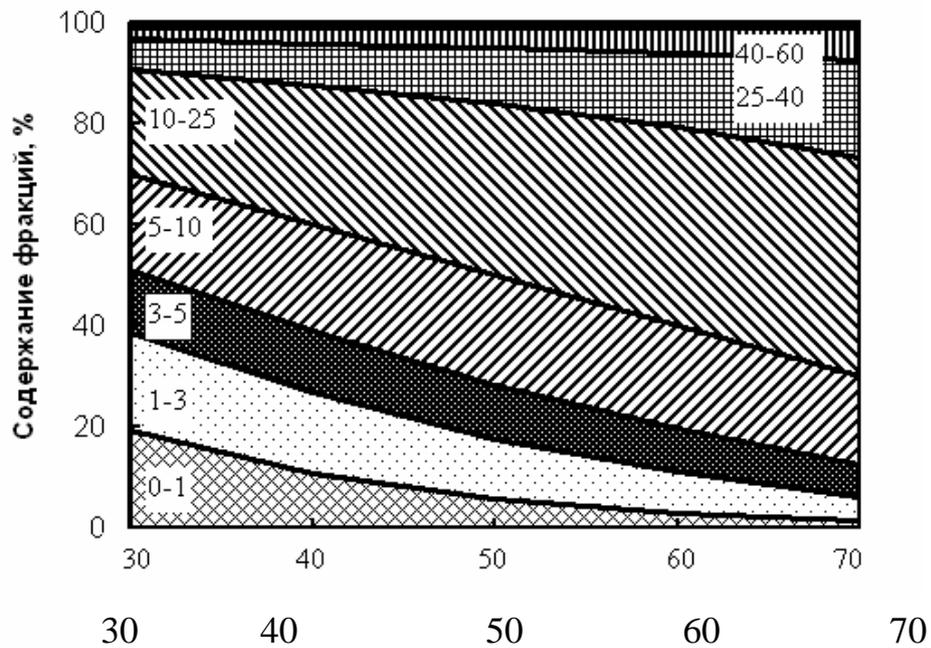


Рисунок 2 - Изменение гранулометрического состава кокса различной горячей прочности CSR в горне и заплечиках: числа на диаграмме – крупность частиц кокса, мм

где g - содержание мелкой фракции, доли единицы;

ε_k – порозность кокса, не содержащего мелких частиц, $\varepsilon_k=0,5$;

$\Phi_{2/3}^k$ – фактор формы, равный для шаров $2/3$, для кокса $\Phi_{2/3}^k=0,5$;

d_m/d_k – отношение диаметров мелких и крупных частиц.

Для кокса ЯКХЗ содержание мелких фракций 0 – 1 и 1 - 3 мм в коксовой насадке составляет 30,68 % (см рис. 1), а средний диаметр частиц - $d_m = 1,34$ мм. Средний диаметр крупных кусков кокса фракции 3 - 60 мм составил $d_k = 15,47$ мм. Подставив рассчитанные значения в формулу (9), определим порозность сухой коксовой насадки без учёта объёма, занятого стекающими жидкими продуктами плавки, которая составит:

$$\varepsilon_k = \frac{0,5 - 0,3086 \cdot \left[1 - \left(\frac{1 - 0,5}{0,5 \cdot 0,5} \right) \cdot \left(\frac{1,34}{15,47} \right) \right]}{1 - 0,3086 \cdot \left[1 - \left(\frac{1 - 0,5}{0,5 \cdot 0,5} \right) \cdot \left(\frac{1,34}{15,47} \right) \right]} = 0,330 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Рассчитанная порозность коксовой насадки при использовании кокса "Северсталь" составила $0,428 \text{ м}^3/\text{м}^3$, Алтайкокса - $0,453 \text{ м}^3/\text{м}^3$, кокса "ВНР Steel" - $0,480 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Таким образом, применение кокса с более горячей прочностью обеспечивает повышение порозности коксовой насадки. Это позволит улучшить дренажную способность горна, снизить вероятность массового горения фурменных приборов, повысить расход вдуваемых добавок, в частности ПУТ.

Выводы и направление дальнейших исследований.

1. Впервые разработана методика, которая позволяет с определенной погрешностью качественно и количественно оценить гранулометрический состав кокса в нижней части доменной печи, связав его с показателем горячей прочности кокса *CSR*.

2. Установлены закономерности изменения гранулометрического состава кокса различной горячей прочности в горне и заплечиках. Увеличение *CSR* сопровождается снижением содержания мелких фракций, 0 – 1, 1 – 3 и 3 – 5 мм, и увеличением доли крупных кусков, 10 – 25 и 25 – 40 мм.

3. Аналитически определена зависимость порозности сухой коксовой насадки без жидких продуктов плавки от горячей прочности кокса. При увеличении горячей прочности кокса с 36,3 до 74,1 % порозность коксовой насадки возрастает от $0,330$ до $0,480 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

4. Разработанная методика оценки гранулометрического состава кокса в нижней части доменной печи открывает новые возможности объективного анализа газопроницаемости коксовой насадки в горне и заплечиках, влияния горячей прочности кокса *CSR* на показатели доменной плавки, прогнозирования случаев загромождения горна и выбора кокса необходимого качества.

В работе рассмотрено влияние горячей прочности кокса на его гранулометрический состав в нижней части доменной печи. Показано, что при снижении горячей прочности кокса в его составе увеличивается содержание мелких фракций, 0 – 1 и 1 – 3 мм, уменьшается доля крупных кусков, 10 – 25 и 25 – 40 мм, и существенно снижается порозность коксовой насадки.

The influence of coke hot durability on his grain composition in lower part of blast furnace is considered in work. It is shown that at the decline of coke hot durability maintenance of shallow fractions, 0 – 1 and 1 – 3 mm, is increased in his composition the stake of large pieces, 10 – 25 and 25 – 40 mm, diminishes and fractional void volume of coke attachment goes down substantially.

Библиографический список

1. Савчук Н.А., Курунов И.Ф. Доменное производство на рубеже XXI века // *Новости черной металлургии за рубежом*. - 2000.- Часть II.- Приложение 5. - М.: ОАО Черметинформация. – 42 с.
2. Патон Б.Е. Ставка на опережение // *Металл*. - 2003.- № 9. – С. 10-13.
3. Эффективность и перспективы применения кислорода в доменной плавке / С.Л. Ярошевский, В.А. Ноздрачев, А.И. Бабиц и др. // *Збірник наукових праць Донецького нац. техн. ун-ту. Серія: Металургія. Випуск 8.* – Донецьк: ДонНТУ, 1999. – С. 39-55.
4. Müllheims K., Peters M., Lüngen H.B. Review of ECSC research work in ironmaking // *3rd International Conference Science and Technology Ironmaking, June 16-20, 2003, Pittsburgh, PA. Düsseldorf.* - P. 1-11.
5. Ярошевский С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива – М.: Металлургия, 1988 – 176 с.
6. Бабиц А.И., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П. Интенсификация использования пылеугольного топлива в доменной плавке – К.: Техника, 1993 – 198 с.
7. Ноздрачев В.А., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П. Перспективные технологии доменной плавки с применением кислорода и пылеугольного топлива – Донецк: Новый мир, 1996 – 173 с.
8. Achievement of high rate pulverized coal injection of 266 kg/t at Fukuyama No 3 blast furnace / I. Okochi, A. Maki, A. Sakai etc. // *European Coke and Ironmaking congress, June 19-22, 2000 Paris La Defense, France. Proceedings, Volume 1.* – P. 196-203.
9. Renliang Z., Kezhong G. Characteristic of 200 kg/t HM PCI and low coke rate of BF in Baosteel // *59th Ironmaking conference, March 26-29, 2000, Pittsburgh, PA. Proceedings.* - P. 321-326.
10. Тараканов А.К., Иващенко В.П. Тенденция и перспективы развития производства чугуна на Украине // *Сталь*. - 2002.- № 8. – С. 13-16.
11. Кокс. Метод определения индекса реакционной способности (CRI) и прочности остатка кокса после реакции (CSR): ГСТУ 4703:2006 (ISO 18894:2006, MOD). – К.: Госпотребстандарт Украины, 2008. – 23 с.
12. Рубинштейн Ю.Б., Волков Л.А. Математические методы в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1987. – 296 с.
13. Дышлевич И.И., Изюмский Н.Н., Журавлёв В.А. Доменное производство Украины: новый подход к оценке качества кокса // *Сборник докладов 8 – го международного семинара «Уголь в металлургии и энергетике».* – Ялта, 2002. – С. 20 - 33.

14. Ухмылова Г.С. Повышение качества кокса на металлургическом заводе в Порт Кембла, Австралия // *Новости черной металлургии за рубежом.* - 2001.- № 2. – С. 29-32.

15. Томаш А.А., Тарасов В.П., Ковалевский И.А. Анализ влияния различных факторов на порозность зернистых материалов // *Известия вузов. Чёрная металлургия,* 1998. - № 9. – С. 8 – 12.