

УДК 669.162.1

Ковальчик Р.В.¹, Томаш А.А.²

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГОРЯЧЕЙ ПРОЧНОСТИ КОКСА CSR НА ЕГО УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД В ДОМЕННОЙ ПЛАВКЕ

Выполнен теоретический анализ влияния горячей прочности кокса CSR на его удельный расход в доменной плавке. В основу расчёта положены современные представления об изменении степени восстановления оксидов железа по высоте доменной печи и данные о зависимости между горячей прочностью кокса CSR и его реакционной способностью CRI

В структуре себестоимости чугуна в Украине затраты на кокс составляют более 50 %, что является важным стимулом для снижения его потребления. Хотя удельный расход кокса при производстве чугуна в нашей стране снизился, этот показатель всё ещё в 1,5 – 1,8 раза больше, чем в странах Европы, Японии и Китае.

Высокая стоимость кокса определяет повышение требований металлургов к его качеству и обуславливает развитие в Украине технологии дувания пылеугольного топлива (ПУТ) в доменные печи.

В мировой практике оценку качества кокса и его поведения в доменном процессе наиболее часто проводят методом корпорации «Ниппон Стил» (NSC) [1], устанавливающей реакционную способность CRI и горячую прочность кокса CSR. Метод NSC принят в ряде стран как национальный стандарт ISO 18894:2006 и планируется к введению в Украине.

Существующие в настоящее время сведения о влиянии горячей прочности кокса CSR на показатели работы доменных печей, в том числе и на удельный расход кокса [2, 3], получены путём обработки статистических данных разных металлургических предприятий. Поэтому они существенно различаются и носят противоречивый характер.

Целью работы явилось теоретическое обоснование влияния свойств кокса на его удельный расход в доменной плавке на основании анализа статей теплового баланса.

Горячая прочность CSR и реакционная способность CRI кокса взаимосвязаны [2]

$$CSR = -1,70 CRI + 101,85. \quad (1)$$

Это явление обусловлено химическими процессами, протекающими в его структуре при высоких температурах и контакте с CO₂, входящим в состав доменного газа. Между углеродом и вкрапленной золой протекают химические реакции. Именно наличие золы, её химический состав и реакционная способность кокса обуславливают впоследствии показатели его горячей прочности. Основными реакциями, протекающими в структуре кокса, являются восстановление золы и образование карбида. В результате обеих реакций ослабляется структура кокса. Вновь образовавшееся вещество не срачивается со стенками ячеек спекшейся массы [4].

В доменной печи восстановление оксидов железа косвенным путём без участия углерода кокса протекает в верхних горизонтах при температуре менее 900 °С. В нижней части доменной печи при температурах свыше 1200 °С железо из оксидов восстанавливается только прямым путём, когда восстановителем является углерод, а косвенное восстановление газами отсутствует. Реакционная способность кокса не может оказывать влияние на развитие химических реакций в этих зонах. На участке температур от 900 до 1200 °С располагается зона смешанного восстановления, в которой развиваются оба восстановительных процесса. Именно в этой зоне сказывается влияние реакционной способности кокса на восстановление оксидов железа. С увеличением CRI возрастает доля реакций восстановления железа твёрдым углеродом. Согласно данным математи-

¹ПГТУ, аспирант

²ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

ческого моделирования, выполненного японскими разработчиками (рис. 1) [5, 6], в интервале температур 900 – 1200 °С степень восстановления оксидов железа R увеличивается на 40 %, от 50 до 90 %. Подобные результаты получены при исследовании восстановительных процессов в действующих доменных печах Магнитогорского металлургического комбината методом горизонтального зондирования [7]. В зоне смешанного восстановления значение R возрастает с 40 до 80 %. Таким образом, 40 % кислорода, связанного с железом, переходит к восстановителю в этой зоне.

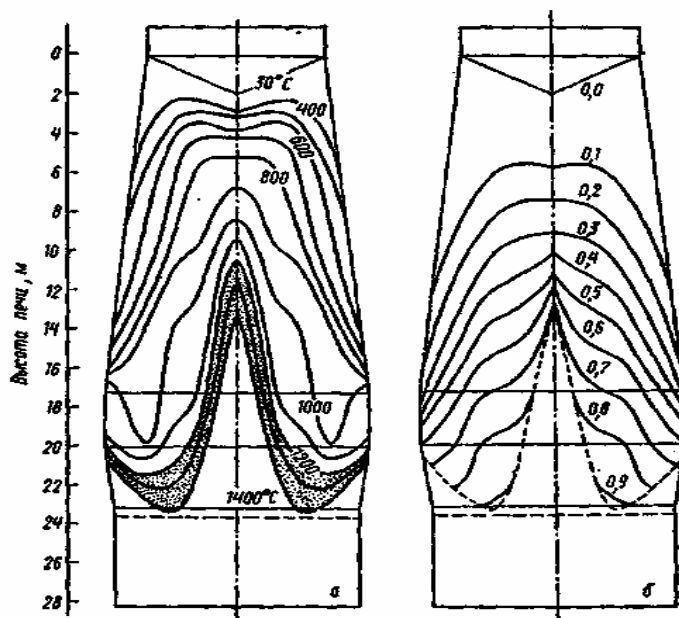
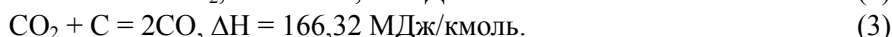


Рис. 1 – Распределение температур (а) и степеней восстановления оксидов железа (б) в доменной печи, рассчитанные с помощью кинетико – математической модели (цифры у кривых – температуры, °С, и степени восстановления, д. ед.)

Восстановление железа углеродом в доменной печи протекает в два этапа по схеме:



Если $\text{CRI} = 0$, то все 40 % кислорода, вступающего в реакцию в зоне с температурами 900 – 1200 °С, взаимодействуют только с газами – восстановителями, и реакция (3) не протекает из-за низкой реакционной способности кокса. Если $\text{CRI} = 100\%$, то из-за очень высокой реакционной способности кокса все 40% кислорода участвуют в прямом восстановлении. В этом случае весь CO_2 в зоне смешанного восстановления прореагирует по реакции (3). При реальных значениях CRI по реакции (3) прореагирует только часть CO_2 пропорционально величине реакционной способности кокса. То есть при значении $\text{CRI} = 25\%$ прямым путём прореагирует $0,01 \cdot 25 \cdot 40 = 10\%$ кислорода, связанного с железом, и 25 % всего образовавшегося в этой зоне CO_2 прореагирует с углеродом кокса. В то же время 30 % связанного с железом кислорода вступит в восстановительные реакции только с газами. Аналогично при $\text{CRI} = 50\%$ вступит в реакцию с твёрдым углеродом $0,01 \cdot 50 \cdot 40 = 20\%$ кислорода, а половина CO_2 в этой зоне прореагирует с углеродом кокса. Остальные 20 % кислорода примут участие в реакциях косвенного восстановления с образованием CO_2 и H_2O . При увеличении CRI на 1% степень прямого восстановления R_d увеличится на 0,4 %.

Обычный железорудный агломерат содержит 54 % железа и 11 % FeO. Содержание кислорода в такой шихте составляет:

$$11 \cdot \frac{16}{72} + (54 - 11 \cdot \frac{56}{72}) \cdot \frac{48}{2 \cdot 56} = 21,92 \%,$$

где 16, 56 и 72 – атомарные массы кислорода и железа и молярная масса FeO, г/моль.

Для получения 1 т чугуна с содержанием железа 94 % необходимо, чтобы в реакции восстановления вступило кислорода, связанного с железом: $1000 \cdot 94 \cdot 21,92 / (100 \cdot 54) = 382$ кг. Следовательно, при степени прямого восстановления $R_d = 100$ % прямым путём восстановится 382 кг кислорода шихты, связанного с железом. Каждому 1 % R_d соответствует $382/100 = 3,82$ кг кислорода из оксидов железа, восстановленного твёрдым углеродом. На увеличение на 1 % степени прямого восстановления R_d потребуется дополнительно тепла: $3,82 \cdot 166,32/16 = 39,7$ МДж/т чугуна.

Углерод кокса сгорает у фурм в соответствии с суммарной реакцией:



Часть теплоты, выделяющейся при сгорании углерода кокса, расходуется на перевод золы в шлак, нагрев кокса до температуры горения, уносится с дополнительным объёмом колошникового газа. В то же время дополнительным дутьём, необходимым для сгорания кокса, вносится физическое тепло. Общее количество теплоты, использующейся в доменном процессе при сгорании 1 кг кокса, рассчитано в таблице.

Таблица – Количество теплоты, использующееся в доменной печи при увеличении расхода кокса на 1 кг

Статья теплового баланса	Порядок расчёта	Поступление тепла, МДж/кг кокса
1. Горение углерода кокса у фурм	$117,84 \cdot 0,86/12$, где 0,86 – содержание углерода в коксе, д. ед. (86 %); 12 – молярная масса углерода, кг/кмоль.	8,45
2. Теплота, расходуемая на перевод золы в шлак	$- 1,25 \cdot 0,12 \cdot 1,95$, где 1,25 – основность шлака; 0,12 – содержание золы в коксе, д. ед. (12 %); 1,95 – энтальпия шлака, МДж/кг.	- 0,29
3. Тепло, поступающее с дополнительным дутьём с температурой 1000 °С и содержанием O ₂ 25 %	$0,001 \cdot (100/25) \cdot 0,86 \cdot (11,2/12) \cdot 1,412 \cdot 1000$, где 11,2 – объём 0,5 кмоль газа, м ³ ; 1,412 – теплоёмкость дутья при температуре 1000 °С, кДж/(м ³ ·°С) [8].	4,53
4. Тепло, уносимое дополнительным объёмом колошникового газа с температурой 300 °С	$- 0,001 \cdot 3,6 \cdot 1,410 \cdot 300$, где 3,6 – выход колошникового газа на 1 кг кокса, м ³ ; 1,410 – теплоёмкость колошникового газа при 300 °С, кДж/(м ³ ·°С) [8].	- 1,52
5. Тепло, расходуемое на нагрев 1 кг кокса до температуры горения 2100 °С	$- 0,001 \cdot 1,09 \cdot 2100$, где 1,09 – теплоёмкость кокса, кДж/(кг·°С) [8].	- 2,29
ВСЕГО		8,88

Таким образом, при увеличении степени прямого восстановления железа на 1 % расход кокса увеличится на $39,7/8,88 = 4,47$ кг. При увеличении CRI на 1 % и, соответственно, R_d на 0,4 % потребуется дополнительный расход кокса $4,47 \cdot 0,4 = 1,79$ кг/т чугуна. В соответствии с соотношением (1) увеличение реакционной способности кокса CRI на 1 % сопровождается снижением его горячей прочности CSR на 1,7 %. Тогда при снижении горячей прочности CSR на 1 % расход кокса увеличится на $1,79/1,7 = 1,05$ кг/т чугуна, или на $100 \cdot 1,05/490 = 0,22$ %, где 490 – средний удельный расход кокса при производстве передельного чугуна на доменных печах Украины, кг/т. График зависимости удельного расхода кокса и степени прямого восстановления R_d от величины горячей прочности CSR приведен на рис. 2.

Результаты анализа влияния индекса CSR на удельный расход кокса с учётом теплового баланса и закономерностей восстановительных процессов в доменной печи практически совпадают с ранее полученными результатами статистической оценки влияния



Рис. 2. – Влияние горячей прочности кокса CSR на удельный расход кокса (1) и степень прямого восстановления R_d (2)

качества кокса на показатели доменной плавки [2]. Применение объективного коэффициента влияния горячей прочности кокса на его расход позволит точнее выполнять технико-экономическую оценку эффективности доменной плавки, выбор рациональной технологии выплавки чугуна и состава угольной шихты для производства кокса.

Выводы

1. Влияние реакционной способности CRI кокса на развитие прямого и косвенного восстановления обнаруживается в зоне смешанного восстановления в интервале температур 900 – 1200 °С, в которой оба процесса протекают одновременно. Развитие восстановления железа твёрдым углеродом в этой зоне пропорционально реакционной способности кокса.
2. Увеличение горячей прочности кокса CSR на 1 % снижает степень прямого восстановления железа R_d на 0,24 % и уменьшает расхода кокса на 1,05 кг/т чугуна или на 0,22 %.

Перечень ссылок

1. Формирование свойств кокса. Реакционная способность / Е.Г. Ковалёв, В.М. Шмалько, И.В. Шульга, А.В. Рыщенко // Углекислотный журнал. – 2006. – № 5 – 6. – С. 13.
2. Влияние реакционной способности и “горячей” прочности кокса на технико-экономические показатели доменной плавки в условиях ОАО “МК Азовсталь” / А.А. Томаш, В.П. Тарасов, Р.В. Ковальчик и др. // Вісник Призов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2007. – Вип. 17. – С. 9 – 13.
3. Влияние термической прочности и реакционной способности кокса на показатели доменной плавки / О.П. Онорин, Ю.П. Щукин, В.В. Филиппов, В.С. Рудин // Новые технологии и материалы в металлургии. – Екатеринбург, 2005. – С. 114 – 119.
4. Цикарев Д.А. Разрушение металлургического кокса под влиянием химического состава золы углей / Д.А. Цикарев // Кокс и химия. – 2002. – № 10. – С. 42 – 43.
5. Blast furnace Phenomena and modeling / Ed. by Yasuo Omori // Elsevier applied science. – London and New York: 1987. – 631 p.
6. Товаровский И.Г. Эволюция доменной плавки / И.Г. Товаровский, В.П. Лялюк. – Днепропетровск: Пороги, 2001. – 424 с.
7. Готлиб А.Д. Доменный процесс / А.Д. Готлиб. – М.: Металлургия, 1966. – 503 с.
8. Доменное производство: Справочник в 2 т. – Т. 1. Подготовка руд и доменный процесс. – М.: Металлургия, 1989. – 496 с.

Рецензент: В.П. Тарасов
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 19.03.2008