

рішню поверхню конвертера. Крім того, потік газу з донних фурм формує кратери збільшеного, у порівнянні із рис.2, а, діаметра із підвищеною висотою гребеня та викиданням збільшених обсягів крапель рідини у напрямку стін конвертера.

Встановлено, що оптимальний згідно з поставленими завданнями варіант комбінованого роздування шлакової ванни досягається у режимі з її пробоем струменями з наконечника верхньої фурми (варіант II розташування верхньої фурми на рис.2, б) при максимальній витраті газу на роздування.

Висновки. В залежності від висоти фурми над рівнем шлаку зони зворотних газових (газорідинних) потоків розташовуються перед, за межами або перетинаються із зонами виходу газу з донних фурм. Встановлено переважний вплив місця розташування донних фурм відносно зон взаємодії верхніх струменів із шлаковою ванною на співвідношення обсягів виносу бризок шлаку у напрямках стін конвертера та стовбура фурми. У випадку розташування верхньої фурми у визначеному діапазоні висот забезпечується практично повне пригнічення винесення шлакових крапель потоком газу з донних фурм на стовбур фурми при рівномірному нанесенні шлаку на футерівку стін.

ЛІТЕРАТУРА

1. Смирнов А.Н. Конвертируемый металл / А.Н.Смирнов // Металл бюллетень. Украина. – 2006. – № 11. – С.64-74.
2. Бойченко Б.М. Конвертерное производство стали / Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. – Днепропетровск, 2006. – 432 с.
3. Effects of the use of twisted nozzles on jet-bath Interaction and on mixing time in a BOF top blow Converter / В.Маia, J.Аlvarenga, R.Reis, R.Tavares // The 6th European Oxygen Steelmaking Conference. – Stockholm. – 2011. – P.94-108.
4. Разработка фурменных устройств и технологии газопорошкового ошлакования футеровки 160-т конвертеров / А.Г.Чернятевич, Е.Н.Сигарев, К.И.Чубин [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – №7 (265). – С.134-138.
5. Моделювання гідрогазодинамічних та теплофізичних параметрів нанесення шлакового гарнісажу і торкрет-покриття на футерівку конвертера / А.Г.Чернятевич, С.Є.Самохвалов, Є.М.Сігарьов [та ін.] // Теория и практика металлургии. – 2010. – № 1–2 (74-75). – С.82-89.

Надійшла до редколегії 19.12.2011.

УДК 669.184.244

СИГАРЕВ Е.Н., к.т.н, доцент
СУББОТ Г.А., магистр

Днепродзержинский государственный технический университет

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ ИЗНОСА ОГНЕУПОРОВ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА

Введение. На современном этапе периклазоуглеродистые огнеупоры MgO-C получили широкое применение в кислородных конвертерах, поэтому уточнение механизма их износа представляет несомненный интерес. К наиболее характерным видам износа огнеупора относят [1]: шлакоразъедание, термическое скалывание, структурное разупрочнение, оплавление, пиропластическую деформацию, расплавную и газовую эрозию, механическое разрушение. Общим недостатком периклазоуглеродистых огнеупоров является окисление и расходование углерода из состава огнеупора, что усугубляет

ся воздействием циркуляционных потоков стали и может привести к значительному абразивному износу обезуглероженного поверхностного слоя.

Многочисленными [1-3] топографическими и петрографическими исследованиями изношенных футеровок показано, что огнеупоры системы MgO-C в процессе эксплуатации претерпевают изменения, выражающиеся в возникновении двух зон на границе «огнеупор-шлак»: наименее изменённой (исходной) и рабочей глубиной 1-2 мм, представляющей собой огнеупор с проникшим в него шлакометаллическим расплавом.

В то же время, исследователями [4] при установленной возможности хорошей адгезии шлака не обнаружены следы реакций между MgO огнеупора и слоем нанесенного шлака. Выявлен газовый зазор на поверхности раздела между MgO-C матрицей футеровки и слоем шлака.

Постановка задачи. В соответствии с концепцией химического износа шлаковый расплав является главным корродиентом периклазоуглеродистой футеровки. Установлено [2], что концентрация FeO на границе с огнеупором у его неизменной зоны снижается с 50 до 0% (на дистанции 0,2 мм), в связи с чем эти оксиды принято считать основным расходуемым элементом проникшего шлака непосредственно у неизменной зоны.

В ходе обстоятельных исследований [3] были сделаны основополагающие выводы о том, что отсутствие износа может быть достигнуто при условии насыщения основного шлака магнезией, повышения вязкости и температуры плавления шлака, а также формированием защитного шлакового гарнисажа на поверхности футеровки.

Целью работы является уточнение представлений о факторах, оказывающих влияние на износ огнеупора системы MgO-C при взаимодействии с компонентами конвертерного шлака.

Результаты работы. Обработкой массива промышленных данных установлено, что повышение температуры шлака при соответствующем увеличении FeO и снижении вязкости шлака в процессе проведения додувок (рис.1, 1) оказывает более существенное влияние на снижение стойкости футеровки конвертера, чем перепады температур при охлаждении футеровки во время текущих простоев (рис.1, 2).

Рабочая зона огнеупора системы MgO-C формируется [2] в результате исчезновения углеродистого покрытия с поверхности зёрен периклаза, смачиваемой шлаком, что приводит к отрицательным последствиям по следующим причинам.

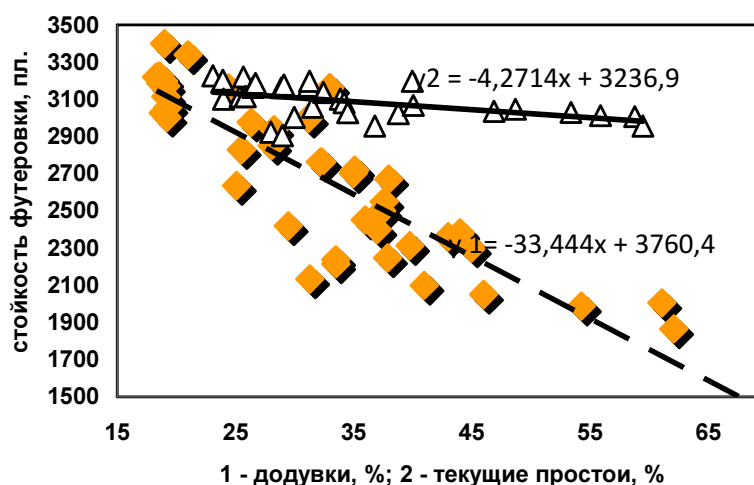


Рисунок 1 – Зависимость стойкости футеровки кислородного конвертера от количества додувок (1) и текущих простоев агрегата (2)

Так как железистый конвертерный шлак практически полностью смачивает поверхность плавящего периклаза (краевой угол смачивания $\theta < 10^\circ$), проникновение шлака в пористый огнеупор при температуре T выше 1400°C протекает в вязкостном режиме, т.е. лимитируется не смачиванием, а вязким течением расплава в порах. Скорость смачивания кристаллов периклаза шлаком настолько высока, что угол натекания шлака q приближается к равновесному уже по истечении 1-й секунды их контакта. Скорость проникновения шлака $dL/d\tau$ определяется его поверхностным натяжением μ , вязкостью η и радиусом поры r :

$$\frac{dL}{d\tau} = \frac{r \cdot \mu \cdot \cos q}{4\eta \cdot L}. \quad (1)$$

При присущих конвертерному шлаку значениях $\mu = 450 \text{ МДж/м}^2$ и $\eta = 0,2 \text{ Па}$ его проникновение на глубину 1-2 мм происходит за 0,9-1,6 сек соответственно в поры минимально возможного для пропитки диаметра ($d=2r$) 5 мкм. При длительности контакта шлакового расплава с обезуглероженной поверхностью зёрен MgO , значительно превышающей период проникновения, шлаковый расплав полностью смачивает их поверхность до углеродистого слоя, где проникновение становится термодинамически невозможным из-за изменения знака угла смачивания $\cos q$ на отрицательный.

Для выяснения условий протекания реакции обезуглероживания углеродистого слоя огнеупора при взаимодействии с окисленным шлаком



важно знать давление $\{\text{CO}\}$.

Образовавшийся монооксид углерода способен оказывать блокирующее действие, препятствуя дальнейшему продвижению шлака в поры и межзёренное пространство, если парциальное давление выделяющегося монооксида углерода (p_{CO}) больше капиллярного давления (p_0). Равновесные значения p_{CO} можно определить из уравнения:

$$p_{\text{CO}} = K \cdot a_{\text{FeO}} \cdot a_{\text{C}} / a_{\text{Fe}}, \quad (3)$$

где a_{FeO} , a_{C} , a_{Fe} – активности соответствующих реагентов; K – константа равновесия реакции (2).

Расчетом значений K косвенным методом с использованием известных данных о константах равновесия реакций, возможных в системе «огнеупор – шлак»

$$\text{C} = [\text{C}]; \quad \lg K_a = -1180/T + 1,29, \quad (4)$$

$$\text{FeO} = \text{Fe}_{\text{мет}} + [\text{O}]; \quad \lg K_b = -6320/T + 2,73, \quad (5)$$

$$[\text{C}] + [\text{O}] = \text{CO}; \quad \lg K_c = 1168/T + 2,07, \quad (6)$$

$$\lg K = \lg K_a + \lg K_b + \lg K_c = -6332/T + 6,09 \quad (7)$$

получена динамика активности оксида железа шлака от состава шлака по ходу плавки.

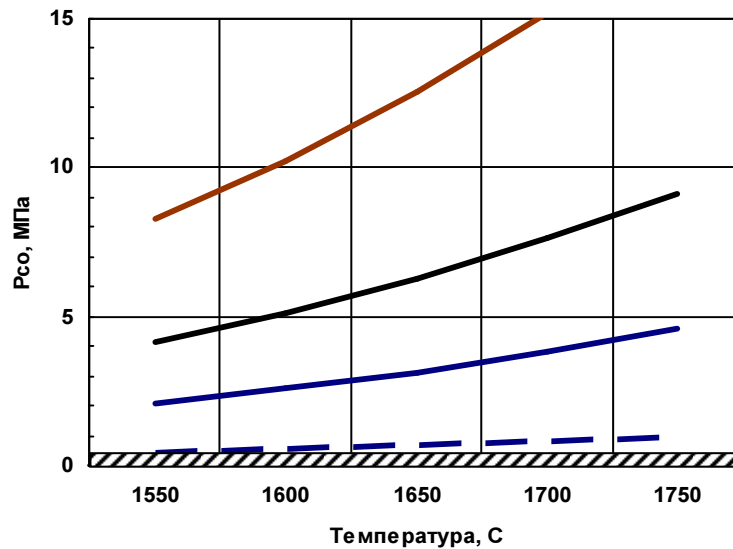
Используя ряд значений a_{FeO} (в диапазоне $1550\text{-}1750^\circ\text{C}$), определили возможные парциальные давления $\{\text{CO}\}$. Для оценки равновесного значения p_{CO} принимали активности углерода огнеупора и железа равными единице. Расчёт вели по уравнению

$$p_{\text{CO}} = K \cdot a_{\text{FeO}} \quad (8)$$

при изменении значений a_{FeO} от 0,05 до 0,45.

Максимальное капиллярное давление шлака в порах $d=5\text{мкм}$ составит:
 $p_o = 4 \cdot \mu / d = 0,36\text{МПа}$; для пор диаметром 100мкм – $0,018\text{МПа}$.

Результаты расчёта приведены на рис.2, в соответствии с которым в исследованном интервале температур и активностей p_{CO} превышает капиллярное давление в порах диаметром 5мкм в исследованном диапазоне значений температуры и a_{FeO} в шлаке.



заштрихованное поле – диапазон значений капиллярного давления
 в порах огнеупора диаметром от 5 до 100 мкм

Рисунок 2 – Равновесное парциальное давление {CO} при различных температурах и значениях a_{FeO}

При активности $a_{\text{FeO}} > 0,01$, характерной для окисленных конвертерных шлаков, равновесное парциальное давление p_{CO} значительно превышает максимальное капиллярное ($0,36\text{МПа}$) в порах 5мкм . В то же время, с понижением концентрации FeO в рабочем слое огнеупора пора любого размера позволяет зародиться и выделиться пузырьку CO. Поэтому пористость огнеупора должна быть минимальна. Кроме того, для обеспечения запираания выделяющимся при реакции (2) {CO} каналов и замедления поступления по ним новых порций жидкого шлака необходимо отсутствие в огнеупоре сквозных (канальных) пор.

Однако, большинство проницаемых для шлака пор огнеупора имеет диаметр $>5\text{мкм}$, и капиллярное давление шлака в них значительно меньше $3,6\text{атм}$ (рис.2). Таким образом, блокирующее действие {CO}, выделяющегося при реакции обезуглероживания (2), оказывается достаточно вероятным.

По ходу взаимодействия углерода огнеупора с монооксидом железа (2) изменяется и состав контактирующего с рабочей зоной слоя шлака с уменьшением содержания в нём оксидов железа и марганца, наиболее агрессивных по отношению к периклазу. Вследствие практически абсолютного смачивания шлаком поверхности MgO работа адгезии его к зёрнам периклаза $W_A = \mu(1 + \cos q)$ близка к удвоенному поверхностному натяжению шлака и составляет около 495МДж/м^2 . Такое значение работы адгезии шлака к поверхности MgO может вызвать вымывание зёрен периклаза футеровки движущимся потоком шлакометаллической эмульсии при продувке металла кислородом в ходе конвертерной плавки.

Разрушение футеровки происходит также и в результате растворения твёрдой фазы (периклаза) огнеупора в шлаке. В рабочей зоне футеровки происходит растворение огнеупора в шлаке, стекающем по её поверхности в ходе продувки со скоростью V_p , определяемой как температурным, так и концентрационным факторами. В диффузионном режиме растворение огнеупора может быть описано уравнением:

$$V_p = \frac{dm}{d\tau} = K_1(C_s - C_o) / D, \quad (9)$$

где K_1 – константа, связанная с природой системы и температурой; C_s и C_o – концентрация MgO в шлаке при насыщении и объёмная; D – толщина диффузионного слоя у поверхности твёрдой фазы, величина которой зависит от гидродинамических характеристик расплава (вязкости η и скорости жидкой фазы относительно твёрдой поверхности w)

$$D = K_2 \sqrt{\left(\frac{\eta}{w}\right)}, \quad (10)$$

где K_2 – константа, учитывающая физические и химические свойства системы «огнеупор-шлак». После соответствующих преобразований для определения скорости растворения получено выражение

$$\frac{dm}{d\tau} = \sqrt{K_3 \cdot w} (C_s - C_o), \quad (11)$$

где $K_3 = f(K_1, K_2)$.

Интенсивность движения слоя шлака, стекающего по поверхности футеровки, пропорциональна вязкости и степени отклонения шлака от состояния его насыщения MgO. Полученное с использованием данных промышленных экспериментов [5] на основе подхода [6] выражение для определения концентрации насыщения конвертерного шлака оксидом магния $(MgO)_{НАС}$ имеет вид:

$$(MgO)_{НАС} = 0,987(MgO)_{НАС}^p + 3,06, \quad (12)$$

где $(MgO)_{НАС}^p$ – расчетная концентрация насыщения шлака оксидом магния по [6]. Расчеты по приведенному выражению в различные периоды продувки показали, что $(MgO)_{НАС}$ определяется, в основном, величиной основности шлака и температурой конвертерной ванны. С повышением температуры (в диапазоне 1550-1650⁰С) и основности шлака с 2,0 до 3,5 значения $(MgO)_{НАС}$ изменяются в пределах 7,4-8,8%. В то же время, при принятой в части конвертерных цехов технологии выплавки стали без использования магнийсодержащих присадок фактическое содержание MgO составляет, в среднем, 6,0-6,8% и 4-4,5% на первой повалке и в конечном шлаке соответственно, что обеспечивает положительные значения $\frac{dm}{d\tau}$.

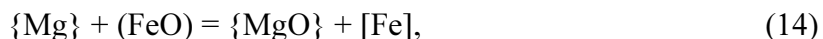
Вязкость основных конвертерных шлаков увеличивается с повышением содержания CaO и особенно MgO. Существенно повышается кажущаяся вязкость шлака при наличии в нем нерастворенных частиц размером 10^{-3} - 10^{-2} мм, вызывающих значительное увеличение внутреннего трения. В основном шлаке такими частицами могут быть кристаллы MgO, CaO, Cr₂O₃. Необходимо отметить, что для оптимального ведения кислородно-конвертерного процесса целесообразно поддерживать минимальную вязкость шлака при повышенной концентрации MgO. По мере ввода MgO вязкость шлака растет, однако максимум ее уменьшается с ростом основности (с 6% MgO при CaO/SiO₂=1 до 2,8% MgO при CaO/SiO₂=3). По мере дальнейшего роста концентрации MgO в шлаке вязкость уменьшается, причем минимум ее с ростом основности смещается в сторону меньших концентраций MgO. Затем наступает повторный рост вязкости при концен-

трации MgO свыше 8%. В то же время, для нанесения шлакового гарнисажа на футеровку после окончания плавки с целью защиты ее от износа необходимо быстро повышать вязкость шлака путем снижения его окисленности и температуры и ввода дополнительного количества MgO (до 10-14%).

При петрографических исследованиях огнеупора [2] обнаружены новообразования практически чистого периклаза на расстоянии 15-10 мм от рабочей зоны. Повидимому, при восстановлении (MgO) углеродом огнеупора



образующийся газообразный магний проникает в поры огнеупора, конденсируется на поверхности зёрен периклаза и вторично окисляется



образуя кристаллы MgO_{тв} и обеспечивая появление корольков Fe в рабочей зоне. Новообразования периклаза уменьшают пористость материала и его газопроницаемость, усиливая блокирующее действие MgO_{тв} и {CO} в рабочей зоне огнеупора.

Таким образом, для снижения V_p необходимо повышение MgO до предельного значения C_s , что может быть достигнуто различными способами. Так, применение в завалку конвертерной плавки доломита разной степени обжига, магниезальных сваров и ожелезнённого доломита позволяет повысить содержание MgO в шлаке с 4,0-5,5% до 12-14%, т.е. до состояния насыщения шлака MgO, и существенно увеличить стойкость футеровки конвертеров, однако приводит к сложностям [3-5] в обеспечении способности шлака к удалению серы и фосфора, а также сопровождается усиленным выносом металла из конвертера с заметалливанием оборудования.

Вдувание магниезальных порошкообразных материалов в расплав конечного шлака перед началом или по ходу его раздувки [5] на футеровку конвертера способно обеспечить повышение содержания MgO с 4,0-5,5% до 8,5-11%. На рис.3 приведены результаты статистической обработки данных [5] по стойкости футеровки конвертера при организации защиты его футеровки от износа гарнисажем из предварительно насыщенного MgO (1) и неподготовленного (2) конечного шлака.

Очевидно преимущество нанесения шлакового гарнисажа раздувкой предварительно подготовленного (1) шлака (с содержанием MgO=8,5-10%) в сравнении с нанесением неподготовленного (2) конечного шлака (с содержанием MgO=4,5-6,0%) на футеровку конвертера.

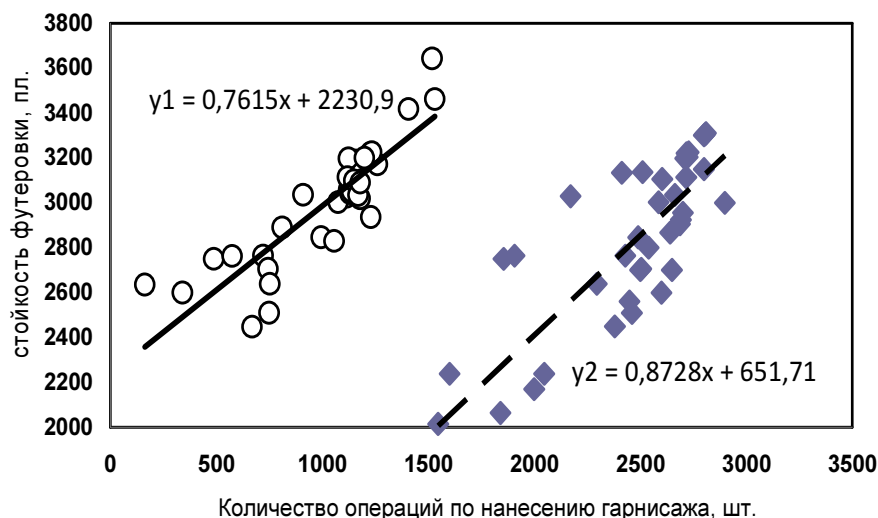


Рисунок 3 – Влияние числа операций и степени подготовки конечного шлака перед раздувкой на стойкость футеровки конвертера

Выводы. Додувки плавки оказывают более существенное влияние на снижение стойкости футеровки конвертера, чем перепады температур при охлаждении футеровки во время текущих простоев. Блокирующее действие $\{CO\}$, выделяющегося при обезуглероживании огнеупоров системы $MgO-C$ оксидом железа шлака, способно предотвращать его глубокое проникновение в рабочую зону футеровки.

Результаты расчетов подтверждают определяющую роль в этом процессе значений активности оксидов железа шлака. В зонах контакта с окисленным шлаком содержание углерода в огнеупорах системы $MgO-C$ должно быть повышенным.

Увеличение содержания MgO в конвертерном шлаке, раздуваемом на футеровку после выпуска стали, наряду с повышением его вязкости и образованием тугоплавких соединений системы $FeO-MgO$, обеспечивает уменьшение пористости рабочего слоя огнеупора, его газопроницаемость и снижает интенсивность износа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорошавин Л.Б. Пути достижения наибольшей износоустойчивости огнеупоров / Л.Б.Хорошавин, В.А.Перепелицын // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – №4. – С.6-9.
2. Бойченко Б.М. Стадии износа периклазоуглеродистых огнеупоров в шлаковом поясе конвертера / Б.М.Бойченко, В.И.Пищида, А.В.Карпичко // Бюллетень «Черная металлургия». – ОАО «Черметинформация». – 2006. – №8. – С.123-128.
3. Grasjean J.C. Consistance des laitiers de convertisseurs et tartinage / J.C.Grasjean, P.V.Riboud // Revue de Metallurgie. – 1983. – V.80. – № 7. – P.571-584.
4. Анализ влияния температуры металла, основности и окисленности магнезиальных шлаков на предел насыщения MgO и рафинирующие свойства / А.А.Бабенко, С.М.Челпан, Л.Ю.Кривых [и др.] // Новые технологии и материалы в металлургии: сб. науч. трудов. – Екатеринбург: УИМ. – 2005. – С.170-178.
5. Разработка фурменных устройств и технологии газопорошкового ошлакования футеровки 160-т конвертеров / А.Г.Чернятевич, Е.Н.Сигарев, К.И.Чубин [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – №7 (265). – С.134-138.
6. Охотский В.Б. Термодинамические характеристики конвертерных шлаков / В.Б.Охотский // Теория и практика кислородно-конвертерных процессов: тр. IV Межд. науч.-техн. конф. – Днепропетровск, 1998. – С.29.

Поступила в редколлегию 24.12.2011.

УДК 669.18:536.001.

ВОЛОШИН Р.В., магистр

Днепродзержинский государственный технический университет

ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОАЛЮМИНИЕВЫХ СЛИТКОВ В ОБЪЕМЕ РАСПЛАВА И НА ГРАНИЦЕ ШЛАК-МЕТАЛЛ В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ

Введение. При производстве качественных сталей используют различные легирующие и технологические добавки, причем практически во всех случаях в сталь вводят раскисляющие материалы, применение которых позволяет снизить активность кислорода в металле для получения заданной структуры слитка, отливки или НЛЗ. В качестве раскислителей обычно используют кремний, алюминий, кальций, титан, цирконий, их сплавы на основе железа или лигатуры.