

Р.Ф. Калимуллин¹, Е.В. Протопопов¹, А.Г. Чернятевич², И.А. Жибинова³

¹Сибирский государственный индустриальный университет

²Институт черной металлургии НАН Украины (г. Днепропетровск)

³Кемеровский государственный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТОРКРЕТИРОВАНИЯ ФУТЕРОВКИ КОНВЕРТЕРОВ КАРБОНАТНЫМИ ТОРКРЕТ- МАССАМИ

Одним из возможных ресурсо- и энергосберегающих вариантов горячих ремонтов футеровки конвертеров может быть комплексная технология, предусматривающая одновременную раздувку конечного шлака азотными газовыми струями и факельное торкретирование с использованием недефицитных торкрет-масс на основе необожженных огнеупорных материалов [1 – 3]. Схема такой технологии приведена на рис. 1. Ремонт футеровки конвертера в этом случае осуществляется с использованием специальной вертикальной газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы (рис. 2), обеспечивающей совмещение операций раздувки шлака и факельное торкретирование [4].

Одновременно в процессе нанесения шлакового гарнисажа путем раздувки конечного шлака азотными струями на поверхность футеровки воздействуют торкрет-факелы, в состав

ве торкрет-массы которых используются такие недефицитные материалы, как утилизированная пыль известково-обжигательного производства, угольная пыль установок сухого тушения кокса, сырые доломит или магнезит в порошкообразном виде. Основной задачей процесса раздувки конечного шлака ($\tau = 3$ ч 5 мин) является дополнительное нанесение на стены конвертера шлакообразующих составляющих (CaO , MgO), которые в течение последующей плавки и продувки конвертерной ванны будут принимать участие в процессе шлакообразования.

При таком варианте «горячего» ремонта футеровки конвертера обеспечивается формирование шлакового гарнисажа с повышенным содержанием оксидов магния и кальция (MgO и CaO) и необходимыми прочностными и огнеупорными свойствами покрытия непосредственно на футеровке. «Подложкой» выступает конечный шлак, который намораживается при разбрызгивании на стены конвертера, а в него внедряются (впрессовываются) высокоогнеупорные составляющие (MgO , CaO) торкрет-массы, принимающие участие в процессе формирования шлака в последующей плавке.

Для разработки технологии важным представляется информация об особенностях диссоциации карбонатов (известняка, сырого доломита, магнезита и т.д.), входящих в состав торкрет-массы. Таким образом, физическая постановка задачи будет иметь следующий вид.

На пути торкрет-факела к поверхности футеровки происходит диссоциация карбонатных частиц, включающая три последовательных этапа: подвод тепла к зоне реакции, химическую реакцию, отвод выделившегося в зоне реакции углекислого газа. Закономерности, описывающие химическое звено процесса диссоциации, могут проявляться только в ограниченной области условий, обеспечивающих принадлежность процесса к кинетической области (относи-

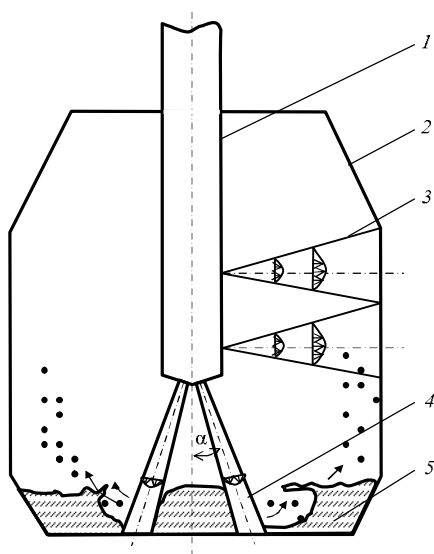


Рис. 1. Схема совместного нанесения шлакового гарнисажа и торкрет-покрытия на футеровку конвертера:

- 1 – торкрет-гарнисажная фурма; 2 – конвертер;
- 3 – торкрет-факел; 4 – нейтральная газовая струя;
- 5 – ванна шлака

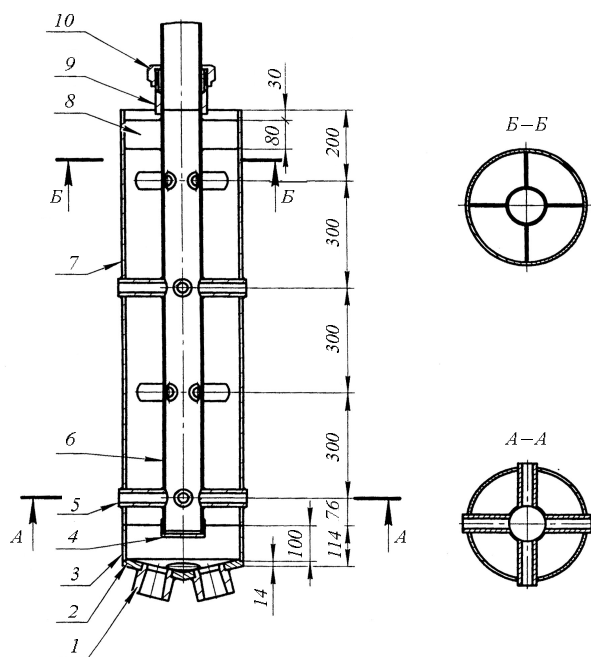


Рис. 2. Схема конструкции головки газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы для конвертера емкостью 350 т:

1 – сопло Лавала; 2 – тарелка; 3 – торцевой наконечник; 4 – заглушка; 5 – боковое цилиндрическое сопло; 6 – внутренняя труба подачи торкрет-массы; 7 – наружная труба; 8 – фиксатор; 9 – патрубок сальникового компенсатора; 10 – гайка компенсатора

тельно низкие температуры, интенсивный подвод тепла и т.д.). В реальных условиях на скорость процесса могут накладывать ограничения процессы переноса тепла и массы.

В связи с недостаточным количеством сведений о параметрах рационального процесса торкретирования при использовании необожженных материалов необходима, прежде всего, информация о кинетических закономерностях диссоциации карбонатов за время нахождения в газовом потоке, условиях окисления и налипания раздуваемой угольно-карбонатной огнеупорной смеси на поверхности футеровки агрегата.

Возможность проведения обжига карбонатных материалов непосредственно в процессе факельного торкретирования оценивали с использованием разработанной математической модели процесса.

В основе разработанной модели лежат следующие принципы и предположения. Угольно-карбонатная пыль подается сжатым азотом в полость конвертера (1500 °С) в кольцевой оболочке струи кислорода через цилиндрические сопла. В специальной торкрет-гарнисажной фурме разработанной конструкции (рис. 2) для реализации рассматриваемой комплексной технологии в конвертерах ОАО «ЕВРАЗ объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» емкостью 350 т

таких парных сопел на четырех горизонтах в цилиндрической части внутреннего пространства кислородного конвертера расположено 16. Внутренний диаметр сопла для вдувания торкрет-массы составляет 28 мм, а ширина кольцевой щели подачи кислорода – 4 мм. Общий расход торкрет-массы колеблется в пределах 0,8 – 1,0 т/мин при интенсивности подачи азота 60 – 80 м³/мин и кислорода 160 – 250 м³/мин. Значения давления кислорода (8 МПа) и азота (4 МПа) у входа в соответствующие короткие сопла превышают критическое давление для цилиндрических сопел, и поэтому струи из сопел истекают со звуковыми скоростями в сжатом виде. После выходного сечения сопла происходит расширение струи, вызванное избыточным давлением и нагревом струи. После выравнивания давления струи и давления окружающей среды направленная струя вызывает инжекцию прилегающих объемов газовой атмосферы конвертера, что приводит к образованию конической формы потока по известным законам организации турбулентного факела [5, 6].

Формируемая сжатым азотом газопорошковая струя имеет большую плотность в сравнении с кислородной струей и «раскрывается» в меньшей степени (по разным данным угол ее раскрытия составляет 5 – 15°, тогда как раскрытие чисто газовой струи достигает 20 – 25°). Поэтому в установившемся режиме работы факела в его сечении можно ожидать неравномерного распределения частиц пыли и компонентов газа. Зажигание угольных частиц происходит, очевидно, с внешней стороны факела и распространяется по ходу его движения внутрь. Запыленная струя имеет большую долю негорючего вещества, и это дополнительно задерживает момент загорания угольных частиц в центральном потоке.

Последовательная замена обожженных огнеупорных частиц на необожженные карбонатные материалы потребует затраты части теплоты горения угля на процесс диссоциации. Если доля угля в составе факела останется неизменной, то температура частиц, долетающих до стенки конвертера, естественно, понизится.

Полный расчет системы с учетом всех отмеченных особенностей затруднен из-за отсутствия ряда теплофизических данных, поэтому имеется два пути решения задачи. В первом случае можно оценить влияние последовательной замены части огнеупорной доли пылевоздушной струи карбонатными материалами, при этом придется воспользоваться расчетным температурным полем факела, полу-

ченным в работе [7] для условий работы фурмы, близких к описанным выше.

Во втором случае необходимо определить тепловой баланс системы в каждом локальном участке факела с учетом горения частиц топлива, диссоциации частиц карбонатных материалов, нагрева огнеупорных частиц и газового объема. На основании такого баланса можно оценить температурное поле факела [8].

В расчете конус основной части факела разбивается на дробные слои равной толщины и присваивается им расчетная температура, полученная в работе [4]. Далее составляется балансовая схема (по теплу) для каждого слоя факела и с учетом расхода части теплоты слоя на эндотермическую реакцию диссоциации рассчитывается новое значение температуры слоя.

Кинетику диссоциации карбоната (Ca, Mg)CO₃ фракции 40 – 60 мкм можно рассматривать в виде объемной модели, поскольку радиус частички карбонатного материала сопоставим с толщиной зоны размытия фронта реакции. Для частиц заданного размера можно использовать тепловую схему термически тонкого тела, температура которого определяется из соотношения скорости подвода теплоты и расходования теплоты на химическую реакцию и нагрев продуктов.

Временем формирования газообразной молекулы CO₂ и выхода ее на поверхность частицы пренебрегаем. После начала химического кипения карбонатного материала частица окружена газовым слоем CO₂, градиент давления которого обеспечивает отток газа от этой частицы в окружающую среду. Поток газа в свободном пространстве зависит от коэффициента вязкости (V_{CO_2}), площади поперечного сечения потока и градиента давления (можно заменить градиентом концентраций, используя соотношение $P = cRT$). Тогда скорость V_g газового потока от частицы можно определить из уравнения

$$V_g = V_{CO_2} 4\pi r^2 (c^n - c^r); \quad (1)$$

здесь c^n , c^r – концентрация CO₂ у внешней поверхности частицы радиуса r и в газовом потоке.

Сопротивлением проницаемости образца и наличием градиента давления вдоль радиуса частички в расчете пренебрегли.

Фронтальная модель диссоциации сферической частицы карбонатного материала

Одной из важных особенностей механизма процесса диссоциации является очень высокая скорость подвода теплоты из-за высокого тем-

пературного градиента. Так, температура химического кипения даже самого термодинамически прочного карбонатного материала (карбоната кальция) составляет 1183 К, тогда как температура внутри факела может достигать 2000 – 2700 К [7]. Твердый раствор карбоната магния в карбонате кальция (доломитизированный известняк) имеет на первой ступени разложения (карбоната магния из раствора) температуру 1000 – 1020 К, т.е. более низкую, чем у CaCO₃. Таким образом, из-за очень высокого температурного градиента можно принять, что фронты диссоциации и первой, и второй ступеней совпадут, и в зоне активного реагирования расчетное значение равновесного давления станет повышенным. В этом случае отвод углекислого газа от фронта превращения можно представить как вязкостно-диффузионный. Поскольку оба потока имеют общую движущую силу (градиент концентраций) и протекают параллельно, то эффективный вязкостно-диффузионный коэффициент можно представить в виде

$$D_{eff,S} = (D_v + D_D)\varepsilon/q, \quad (2)$$

где $D_v = \frac{c_0 P_0}{\nu \rho}$ – коэффициент проницаемости потока, м²/с; c_0 – проницаемость вещества, м²; ρ – плотность газа при давлении P_0 , кг/м³; ν – кинематическая вязкость газа, м²/с; D_D – коэффициент диффузии (Фика), м²/с; ε – пористость вещества; q – коэффициент неориентированности пор.

Таким образом, при равенстве скорости химической реакции диссоциации и скорости оттока углекислого газа (CO₂) через слой извести и приведенную пленку, получаем следующую зависимость [9]:

$$\frac{\partial \omega_k}{\partial \tau} = \frac{3(C_i^* - C_i^r)}{r_{k,0} \rho_k \left[\frac{1}{K_G} + \frac{r_{k,0}(r_{k,0} - r_{k,i})}{D_{eff,S} r_{k,i}} + \frac{r_{k,0}^2}{k_{s,k}} \right]}, \quad (3)$$

где $\omega_k = \frac{r_{k,0}^3 - r_{k,i}^3}{r_{k,0}^3}$ – степень диссоциации кар-

бонатного материала; C_i^* , C_i^r – равновесная концентрация реакции диссоциации и концентрация вокруг i -й частицы карбонатного материала; K_G – константа массоотдачи, м/с; $r_{k,0}$ и $r_{k,i}$ – исходный и текущий радиус частицы; $k_{s,i}$ – константа скорости химической реакции, м/с.

Разделив переменные и проинтегрировав с учетом начальных условий ($\tau = 0, \omega = 0$), при использовании выражения $F = 1 - (1 - \omega)^{1/3}$ получим следующую зависимость:

$$\tau = \frac{r_{k,0} \rho_k}{C_i^* - C_i^r} \left[\frac{\omega_k}{3K_G} + \frac{3F^2 - 2F^3}{6D_{eff,S}} r_{k,0} + \frac{F}{k_{s,k}} \right]. \quad (4)$$

Объемная модель диссоциации сферической частицы карбонатного материала

Как видно из анализа публикаций, связанных с кинетикой диссоциации карбонатных материалов, обычно принимается фронтальный характер процесса. Для образцов карбонатного материала, характерная фракция которых превышает 0,003 м, выбор такой модели подтверждается как прямыми наблюдениями фронта реагирования, так и хорошим согласованием кинетических экспериментов с результатами вычислительных экспериментов на фронтальных моделях. В то же время анализ кинетических и теплофизических возможностей процесса показывает, что реальный процесс должен развиваться с размытием зоны активного реагирования. Несмотря на то, что толщина этой зоны невелика и может не учитываться в крупных образцах, для мелких частиц карбонатного материала она может сравниться или даже превысить диаметр частицы. В этом случае может использоваться объемная модель процесса.

Баланс между расходуемой массой карбонатного материала и массой газа CO_2 , выделяемого из этого материала за счет протекания химической реакции диссоциации, имеет вид

$$\frac{4}{3} \pi r_{k,0}^3 \rho_{\text{CO}_2} \frac{\partial \omega_k}{\partial \tau} = \frac{4}{3} \pi r_{k,0}^3 (1 - \omega_k) k_v (C_k^* - C^r). \quad (5)$$

После соответствующих преобразований получим

$$\omega_k = 1 - e^{-k_v (C_k^* - C^r) \tau / \rho_k} \quad (6)$$

или

$$\omega_k = 1 - (1 - \omega) e^{-k_v (C_k^* - C^r) \Delta \tau / \rho_k}; \quad (7)$$

здесь k_v – константа объемной скорости реакции, 1/с; ω – степень диссоциации карбонатного материала на предшествующем интервале времени $\Delta \tau$.

Во время нахождения в раскаленном газовом потоке частица карбонатного материала

нагревается по радиационно-конвективному механизму. Обычно теплообмен на поверхности частицы задается уравнением

$$\alpha_k (T_R - T) + \beta (T_R^4 - T^4) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial R}, \quad (8)$$

при этом в случае термически тонкого тела температура всего тела постоянна. Тогда тело воспринимает такое количество теплоты, которое компенсируется эндотермической реакцией диссоциации. В этом случае уравнение (8) можно заменить на следующее:

$$4\pi R^2 [\alpha_k (T_R - T) + \beta (T_R^4 - T^4)] = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \Delta H_{T_R} \rho_k \frac{\partial \omega}{\partial \tau}. \quad (9)$$

После преобразований с вводом приведенного коэффициента теплообмена ($\alpha_{пр}$) получим уравнение

$$T = T_R - \frac{\Delta H_{T_R} \rho_k R_0}{3\alpha_{пр}} \frac{k_v (C_k^* - C^r) (1 - \omega)}{\rho_{\text{CO}_2}}, \quad (10)$$

по которому можно вычислить температуру T образца карбонатного материала для заданной степени диссоциации. Для этой же степени диссоциации по выражению (6) можно определить время, необходимое для ее достижения. Результаты расчетов для температуры 1800 К приведены на рис. 3.

Представленные данные и результаты расчетов позволили сделать вывод, что быстрый прогрев частицы весьма эффективно влияет на кинетику диссоциации. За реальное время нахождения частицы в потоке она успевает нагреться до средней температуры факела. Таким образом, частичная замена огнеупорной пыли карбонатным материалом в торкрет-массе абсолютно допустима и обеспечивает возможность реализации такого варианта технологии торкретирования и ремонта футеровки.

Выводы. Для условий технологии ремонта футеровки конвертеров путем совместной раздувки конечного шлака с факельным торкретированием недефицитными торкрет-массами разработана модель диссоциации карбонатной пыли в торкрет-факеле. Результаты расчетов свидетельствуют о возможности существенной замены части обожженной огнеупорной составляющей торкрет-массы пылью доломитизированного известняка, сырого доломита и магнезита. Частицы огнеупора, карбонатного материала или продукта его диссоциации

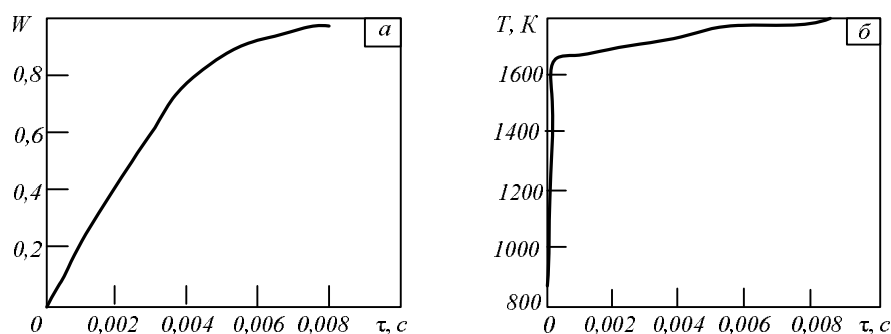


Рис. 3. Кинетика (скорость W уменьшения размера частиц) диссоциации частицы карбонатного материала размером 0,0025 м (а) и изменение ее температуры по ходу процесса (б)

остаются твердыми вплоть до контакта с поверхностью футеровки. Капли золы выполняют роль связующего материала, удерживающего огнеупорные частицы на стенке конвертера. Примеси в самом огнеупорном материале снижают температуру их плавления и способствуют эффекту прилипания к футеровке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айзатулов Р.С., Протопопов Е.В., Соколов В.В. и др. Совершенствование технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров ОАО ЗСМК. – В кн.: Современные проблемы производства стали и управление качеством подготовки специалистов. Материалы научно-методической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения ученого-металлурга Меджибожского М.Я. (11 – 13 сентября 2002 г.). – Мариуполь: изд. ПГТУ, 2002. С. 89 – 92.
2. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Соколов В.В. и др. Процессы теплообмена в условиях нанесения шлакового гарнисажа и факельного торкретирования футеровки конвертеров. Математическая модель // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 10. С. 8 – 13.
3. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Соколов В.В. и др. Исследование процесса нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера с использованием фурм, приспособленных для раздувки шлака и факельного торкретирования. – В кн.: Труды VIII конгресса сталеплавателей, 18 – 22 октября 2004. – Нижний Тагил, 2004. С. 133 – 139.
4. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В., Шеремет В.А. и др. Разработка конструкций фурменных устройств для горячего ремонта футеровки конвертеров // Теория и практика металлургии. 2010. № 1 – 2 (74 – 75). С. 68 – 73.
5. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука. – 1969. – 824 с.
6. Брюханов О.Н., Мاستрюков Е.С. Аэродинамика, горение и теплообмен при сжигании топлива. Справочное пособие. – СПб.: Недра, 1994. – 317 с.
7. Шершнева А.А., Бадах В.Ф., Смыслов Ю.Н. // Огнеупоры. 1986. № 6. С. 46 – 49.
8. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
9. Теория металлургических процессов / В.Б. Охотский, О.Л. Костелов, В.К. Симонов и др. – Киев: ИЗМН, 1997. – 512 с.

© 2013 г. Р.Ф. Калимуллин,
Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич,
И.А. Жибинова
Поступила 19 сентября 2013 г.