Выводы

Предложена модель движения пузыря неассимилируемого газа в жидкости в пузырьковом и струйном режимах.

Выполнены расчёты, позволяющие с достаточной точностью определить скорость всплывания газовых пузырей, время наполнения его газом, скорость подъёма вершины купола пузырька и скорость истечения газа из сопла.

Список использованных источников:

1. Харлашин П.С. Изменение уровня жидкости при донной продувке неассимилируемым газом. // П.С. Харлашин, А.Н. Яценко, В.Я. Бакст, В.М. Бакланский. – Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 2. – С. 56-60.
2. Белов И.В. Стационарная скорость всплывания пузырей в некоторых жидкостях. // И.В. Белов, Г.Н. Еловиков, Б.Е. Окулов. – Сталь. – 1975. – № 3. – С. 85 – 92.
3. Баканов К.П. Рафинирование стали инертным газом / К.П. Баканов, И.П. Бармотин, Н.Н. Власов и др. – М.: Металлургия, 1975. – 232 с.

Рецензент: А.М. Скребцов,
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 19.04.2010

УДК 669.046.046

Харлашин П.С.,[1] Протопопов Е.В.,[2] Бакст В.Я.,[3] Харин А.К.,[4] Яценко А.Н.[5]

ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ШЛАКОВОГО ГАРНИСАЖА НАПРАВЛЕННОЙ РАЗДУВКОЙ СТРУЯМИ ГАЗА

В работе указаны главные стадии процесса нанесения шлака на поверхность футеровки кислородных конвертеров. Рассмотрены основные принципы математического моделирования и оптимизации процесса ошлакования футеровки агрегатов путём направленной раздувки части конечного шлака струями нейтрального газа. Выявлены определяющие числа подобия и симплексы однородных величин, входящие в аналитическое выражение для определения относительной массы образующего гарнисаж шлака.
Ключевые слова: *шлак, раздувка, нейтральный газ, математическое моделирование,числа подобия.*

Харлашин П.С., Протопопов Є.В., Бакст В.Я., Харін О.К., Яценко А.М. Принципи моделювання процесу нанесення шлакового гарнісажу направленою роздувкою струменями газу. *У роботі вказані головні стадії процесу нанесення шлаку на поверхню футеровки кисневих конвертерів. Розглянуті основні принципи математичного моделювання і оптимізації процесу ошлакування футеровки агрегатів шляхом направленого роздування частини кінцевого шлаку струменями нейтрального газу. Виявлені визначальні числа подібності і симплекс однорідних величин, що входять до аналітичного виразу для визначення відносної маси утворюючого гарнісаж шлаку.*

[1] *д-р техн. наук, профессор, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь*
[2] *д-р техн. наук, профессор,Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Российская Федерация*
[3] *канд.техн. наук, доцент, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь*
[4] *инженер, «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», г. Мариуполь*
[5] *ассистент, Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь*

Ключові слова: *шлак, роздування, нейтральний газ, математичне моделювання, числа подібності.*

Kharlashin P.S., Protopopov E.V., Bakst V.Ya., Kharin A.K., Yatsenko A.N. Principles of modelling of the process of slag skull coverage by means of design of process of directed gas jet blowing. *The main stages of the process ofslag covering upon refractory lining of oxygen converters were depicted in the article. Described were basic principles of mathematical modelling and optimization of the process of slag covering upon refractory lining of unit, by means of directed blowing of a part of finished slag by jets of neutral gas .Determined were criteria numbers of similarity and simplex of homogeneous values, which are part of analytical expression, required for estimation of relative mass of slag, forming the skull.*
Keywords: *slag, blowing, neutral gas, mathematical design, numbers of similarity.*

Постановка проблемы. Практика современного кислородного конвертирования в качестве составляющей цикла плавки предусматривает методы текущего частичного восстановления футеровки агрегатов путем нанесения торкрет – покрытия или шлакового гарнисажа [1-3]. Использование гарнисажных технологий после каждой плавки является эффективным ресурсосберегающим приемом, позволяющим существенно увеличить продолжительность кампании агрегата и, соответственно, технико-экономические показатели его работы.

Анализ последних исследований и публикаций. Однако, до настоящего времени режимные параметры раздува шлака основываются, как правило, на эмпирических, статистических показателях и поэтому не содержат конкретных обобщающих рекомендаций. В связи с этим оптимизации гарнисажной защиты футеровки может рассматриваться на основе математического или физического моделирования процесса.

Цель статьи – формулирование основных принципов моделирования гарнисажных технологий и установление структуры зависимости технологических показателей от определяющих критериев и симплексов.

Известные методы теории подобия позволяют обозначить определяющие критерии, с помощью которых можно описать рассматриваемые явления.

Изложение основного материала. Процесс нанесения шлака на поверхность футеровки состоит из следующих основных стадий [4,5]:

– образование под действием газового потока шлакового кратера и вылет с его поверхности отдельных капель различного размера;

– перемещение отраженными потоками газа по некоторым траекториям капель шлака к поверхности футеровки;

– соприкосновение и сцепление шлаковых капель с огнеупором футеровки.

Первую из указанных стадий характеризуют следующие переменные параметры: расход $w_г$, м^3/с и плотность газа $\rho_г$, кг/м^3; плотность жидкого шлака $\rho_ш$, кг/м^3; коэффициенты динамической вязкости $\eta_ш$ и $\eta_г$ шлака и газа, кг/(м·с); диаметр сопла фурмы d_c, м и расстояние от среза сопла до поверхности шлака h_c, м; глубина шлаковой ванны $h_ш$, м.

Для характеристики второй стадии необходимы: расход несущего газа $w_г$, м^3/с , глубина $h_л$ и радиус $r_л$ образующейся в шлаке лунки, м; радиус конвертера $r_{конв}$, м; средний диаметр разбрызгиваемых капель $d_к$, м; ускорение свободного падения g, м/с^2.

Описание третьей стадии требует учета таких переменных параметров: коэффициента межфазного натяжения футеровка – шлак $\sigma_{ф\text{-}ш}$, Н/м; плотности шлака $\rho_ш$, кг/м^3 и его динамической вязкости $\eta_ш$, кг/(м·с); ускорения свободного падения g, м/с^2.

На основании известных из теории подобия методов получения безразмерных комплексов физических величин можно получить три показателя, определяющих процесс гарнисажного покрытия поверхности футеровки конвертера.

Отметим предварительно, что кинематическая вязкость $\nu = \eta/\rho$, при скорости потока газа $\upsilon_г\, w_г \sim \upsilon_г l^2$, имеем

$$\pi_1 = \frac{\nu}{\upsilon_г l}, \qquad (1)$$

$$\pi_2 = \frac{\sigma \upsilon_г l^2}{\nu \rho}, \quad (2)$$

$$\pi_3 = \frac{g \upsilon_г^3 l^6}{\nu^5}, \quad (3)$$

где l – характерный линейный размер, которым могут быть диаметр сопла, высота фурмы и др.

Полученные комплексы представляют собой известные числа подобия, представленные в определённой взаимосвязи. Упоминаемые числа подобия отражают соотношения сил инерции, вязкости, капиллярности и тяжести, а именно

$$\pi_1 = \mathrm{Re}^{-1}, \quad (4)$$

$$\pi_2 = \mathrm{Re}^3 / We, \quad (5)$$

$$\pi_3 = \mathrm{Re}^5 / Fr^2, \quad (6)$$

где $\mathrm{Re} = \frac{\upsilon l}{\nu}$, $We = \frac{\upsilon^2 \rho l}{\sigma}$, $Fr = \frac{\upsilon}{(gl)^{0,5}}$ –соответственно числа Рейнольдса, Вебера и Фруда.

Можно ожидать, что на исследуемые процессы влияют симплексы однородных величин (S_i), например, $H_c = h_c/d_c$ – относительная высота фурмы; $H_ш = h_ш/d_{конв}$ – относительная высота слоя шлака; $D_a = d_a/d_c$ – относительный диаметр агрегата; $P_ш = \rho_ш/\rho_г$ – относительная плотность шлака; $N_ш = \nu_ш/\nu_г$ – относительная вязкость шлака, $\Sigma = \sigma_{ф\text{-}ш}/\sigma_ш$ – относительная поверхностная энергия (здесь: d_a – диаметр агрегата, м; d_c – диаметр сопла, м).

Если безразмерной массой гарнисажа $M_{гр}$ обозначить отношение его массы $m_{гр}$ к массе оставленного для раздува шлака m_o, то можно считать, что

$$M_{гр} = f(\mathrm{Re}, \mathrm{We}, \mathrm{Fr}, S_i). \quad (7)$$

Характерный линейный размер, входящий в числа Архимеда, Вебера и Фруда должен определяться из физической природы явления и соотношения сил, которое характеризует это число; по этой причине линейный масштаб может быть различным [6]. В частности, число Re характеризует режим течения газа и включает диаметр сопла; число Вебера представляет собой соотношение сил динамического напора газа и капиллярных сил шлака и должно содержать радиус кривизны поверхности лунки жидкого шлака $r_л$, который, в свою очередь, зависит от диаметра сопла и высоты фурмы. Линейным масштабом для числа Фруда, характеризующего соотношения сил инерции и тяжести, может быть принят средний диаметр разбрызгиваемых капель $\overline{d_к}$. Очевидно, величина $\overline{d_к}$ зависит от $w_г$ и $\upsilon_г$, а в случае их постоянства, от h_c и d_c, т.е. от H_c и в первом приближении можно принять $\overline{d_к} = \sqrt{d_c h_c}$.

Теория подобия позволяет получить зависимость безразмерной массы от параметров процесса

$$M_{гр} = A \mathrm{Re}^{n_1} \cdot We^{n_2} \cdot Fr^{n_3} \cdot P_ш^{n_4} \cdot \Sigma^{n_5} \cdot N_ш^{n_6} \cdot H_c^{n_7} \cdot D_a^{n_8} \cdot H_ш^{n_9}, \quad (8)$$

где A и n_i – некоторые постоянные величины.

Естественно предположить, что влияние некоторых параметров окажется несущественным, и выражение (8) может быть упрощено. Так, значение показателя n_9 можно установить по данным холодного моделирования, показавшего близкую к линейной зависимость количества капель от относительной глубины жидкости при малых величинах $H_ш$ (см. рисунок).

При классических конвертерных технологиях масса жидкого шлака составляет 10 –12 % от массы металла; в этих условиях относительная толщина слоя шлака в конце процесса составляет 0,05 – 0,06 и не превышает 0,1, что даёт основание показатель степени n_9 считать равным единице.

Поверхностная энергия Σ при условии прилипания капель шлака к футеровке не окажет существенного влияния на процесс. Поскольку величина H_c своими составляющими входит в числа Re, We и Fr, её влияние не рассматривается.

С учётом указанных особенностей соотношение (8) может быть представлено в виде

$$M_{гр} = A \mathrm{Re}^{n_1} \cdot We^{n_2} \cdot Fr^{n_3} \cdot N_ш^{n_4} \cdot D_a^{n_5} \cdot H_ш. \quad (9)$$

Дальнейшее совершенствование структуры уравнения (9) требует подробного анализа физической природы процессов, характеризующих все стадии технологии гарнисажной защиты футеровки конвертеров.

Выводы

1. Рассмотрение совокупной модели гарнисажной технологии должно основывать на рассмотрении отдельных стадий процесса.
2. Кроме определяющих чисел Re, We и Fr процесс прилипания шлака к футеровке конвертера характеризуется рядом симплексов однородных физических величин.
3. Закономерности протекания отдельных стадий технологий могут описываться не только произведением, но и суммой (разностью) существенных параметров процесса.

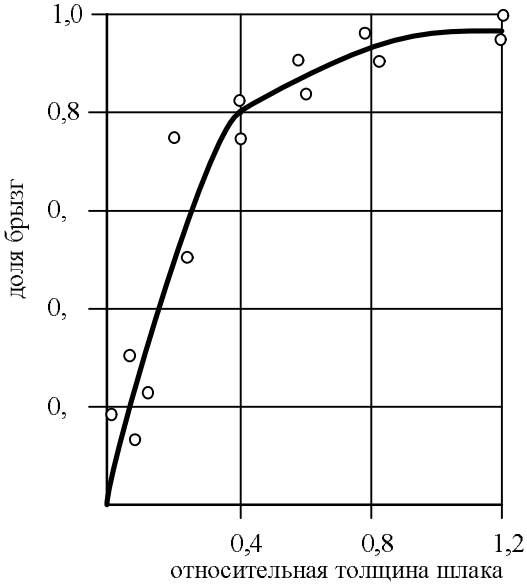

Рисунок – Зависимость относительной скорости разбрызгивания жидкости от относительной толщины её слоя

Список использованных источников:

1. *Лякишев Н.П.* Сравнительная характеристика состояния кислородно-конвертерного производства стали в России и за рубежом. / *Н.П. Лякишев, А.Г. Шалимов.* – М.: Элиз, 2000. – 64 с.
2. *Айзатулов Р.С.* Совершенствование способов ремонта футеровки 160-т конвертеров с применением нейтральных газов. / *Р.С. Айзатулов, Е.В. Протопопов, В.В. Соколов и др.* // Сталь. – 1999. - № 5. – С. 39 – 42.
3. *Айзатулов Р.*С. Теоретические основы сталеплавильных процессов. / Р.С. Айзатулов, Е.В. Протопопов, П.С. Харлашин. – М.: МИСиС, 2002. – 315 с.
4. *Тахаутдинов Р.С.* Исследование процесса нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера. / *Р.С. Тахаутдинов, Б.А. Буданов, А.М. Столяров* // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2001 . - № 8. – С. 26-28.
5. *Мокринский А.В.* Перспективные направления продления срока службы футеровки конвертеров. / *А.В. Мокринский, А.Н. Лаврик, В.В. Соколов и др.* // Сталь. – 2004. - № 5. – С. 40-44
6. *Максимов Ю.М.* Математическое моделирование металлургических процессов. / *Ю.М. Максимов, И.М. Рожков, М.А. Саакян.* – М.: Металлургия, 1976. – 288 с.

Рецензент: А.М. Скребцов,
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 20.04.2010