

Е. Н. Сигарев /д. т. н./, Н. К. Сигарев /к. т. н./,
Н. Н. Недбайло, Ю. В. Байдуж
Днепропетровский государственный
технический университет

К. Г. Низяев /д. т. н./
Национальная металлургическая академия
Украины

Определение параметров раздувки шлаковой ванны на футеровку конвертера

Изучены закономерности распределения слоя шлакового гарнисажа, полученного путем раздувки шлаковой ванны азотными струями в различные периоды кампании агрегата по высоте конвертера.

Предложена методика расчета параметров раздувки шлаковой ванны для получения заданной толщины гарнисажного слоя и рационального профиля рабочего пространства. (Ил. 4. Библиогр.: 12 назв.)

Ключевые слова: конвертер, шлаковая ванна, азот, гарнисаж, раздувка, ошлакование, сканирование.

The regularities of the distribution layer slag scull obtained by blowing slag bath nitrogen jets at different periods of the campaign the unit at a height converter.

The method calculating parameters of the slag bath blowing to obtain the desired thickness of the layer skull and rational profile workspace.

Key words: converter, slag bath, nitrogen, skull, blown, scanning.

Актуальность и постановка задачи исследования

Повышение стойкости периклазоуглеродистой футеровки кислородных конвертеров на металлургических комбинатах Украины в настоящее время обеспечивается в основном совершенствованием различных вариантов ее ошлакования за счет раздувки азотными струями модифицированного конвертерного шлака. При этом необходимо обеспечить рациональный режим нанесения гарнисажного покрытия, предусматривающий:

- формирование на поверхности футеровки прочного гарнисажного шлакового слоя с сохранением оптимального профиля рабочего пространства конвертера;

- восстановление рабочего профиля в зонах повышенного износа футеровки с минимизацией накопления шлака на днище и подъема его уровня;

- предотвращение образования шлаковой настывки на фурме и сокращение объемов выноса шлаковых капель через горловину агрегата.

Успешное выполнение поставленных задач определяется рядом условий и факторов: наличием достоверных данных о текущем профиле рабочего пространства агрегата, величинами расхода и давления азота, подаваемого на раздувку шлаковой ванны, конструкцией фурмы (количество и угол наклона сопел), положением фурмы относительно поверхности шлаковой ванны и т. п.

В связи с техническими и организационными сложностями определения в производствен-

ных условиях фактической толщины сформированного гарнисажного слоя рядом исследователей предложены различные схемы и методы расчета, учитывающие теплофизические особенности формирования гарнисажного слоя [1; 2] и гидрогазодинамику [3; 4] раздувки шлаковой ванны газовыми струями.

Представленные в [2–4] сведения о распределении сформированного гарнисажного слоя по высоте рабочего пространства конвертера свидетельствуют в пользу изменения толщины гарнисажа с 5–8 мм у горловины до 35–200 мм в нижней части агрегата. В то же время полученные результаты имеют широкий разброс значений толщины гарнисажного слоя по высоте конвертера, рекомендуемой продолжительности операции и требуют уточнения методики расчета ее параметров.

Цель работы

Определение прямыми замерами фактической толщины и профиля гарнисажного слоя на футеровке, сформированного раздувкой шлаковой ванны; разработка методики расчета параметров и прогнозирования результатов раздувки шлаковой ванны газовыми струями на футеровку конвертера.

Методика исследования

Для организации направленного выноса потока шлаковых капель в область наиболее интенсивного износа футеровки 260-т конвертера в конвертерном цехе ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского» (ПАО «ДМКД») используют 6-сопловую фурму со сгруппированными по три соплами

Лавалья различного диаметра [5]. Наконечник фурмы (рис. 1), спроектированный и внедренный в практику Ю. И. Шишом, имеет следующие основные характеристики: 2 симметрично размещенных в направлении цапф конвертера сопла Лавалья с критическим ($d_{кр}$) и выходным ($d_{вых}$) диаметрами сопел 43 и 49 мм соответственно; 4 дополнительных сопла Лавалья с $d_{кр} = 37$ мм и $d_{вых} = 43$ мм соответственно; угол наклона сопел к вертикальной оси фурмы $\alpha_1 = 17^\circ$ и в плане между осями соседних сопел по $\gamma_1 = 50^\circ$ (между соплами $d_{кр} = 37$ мм и $d_{кр} = 43$ мм); между группами сопел – 80° .

Результаты работы

В соответствии с принятой в цехе технологией предварительно модифицированный присадками магнезиальных добавок конечный конвертерный шлак раздувается азотом (с расходом $600\text{--}700 \text{ м}^3/\text{мин}$) на протяжении 4– 8 мин при ступенчатом изменении положения наконечника фурмы (рис. 1) относительно днища конвертера от 4 до 0,5 м.

С целью определения фактической толщины сформированного гарнисажного слоя провели сканирование профиля с использованием интерферометра фирмы *LaCam M007* (фирмы *Ferrotron Technologies GmbH*, Германия) в первый период кампании 260-т конвертера по футеровке (501 плавка – I вариант) и на завершающем этапе кампании (4131 плавка – II вариант). С це-

лью фиксации сканированием исходного профиля рабочего пространства перед проведением конвертерных плавов № 500 и № 4130 (по футеровке) раздувку шлаковой ванны на футеровку не осуществляли. После выпуска стали и раздувки в течение 5 мин конечного шлака, содержащего (%) 45,3/49,1 CaO; 18,7/21,1 SiO₂; 6,9/7,3 MgO; 10,5/15,8 FeO, с начальной массой шлаковой ванны 18,9/20,1 т (для I/II вариантов соответственно), осуществляли повторное сканирование рабочего пространства.

Данные обработки результатов сканирования геометрии рабочего пространства конвертера до и после раздувки шлака представлены на рис. 2.

Полученная прямыми замерами (рис. 2) толщина гарнисажного слоя в целом соответствует результатам расчетов, представленных в [2–4], в то же время характер распределения слоя по высоте агрегата имеет некоторые отличия (рис. 3). Как известно из практики проведения операции раздувки, на поверхность футеровки переносится от 30 до 50 % начального объема шлаковой ванны.

В данной работе предполагали, что общий объем сформированного гарнисажного слоя соответствует суммарному объему капель шлака, выносимых из шлаковой ванны и достигающих поверхности футеровки.

Принимали, что струя газа, выходящая с постоянной скоростью V_0 из сопла Лавалья, образу-

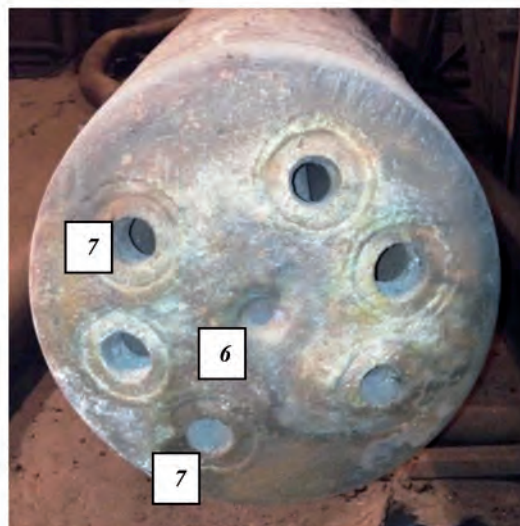
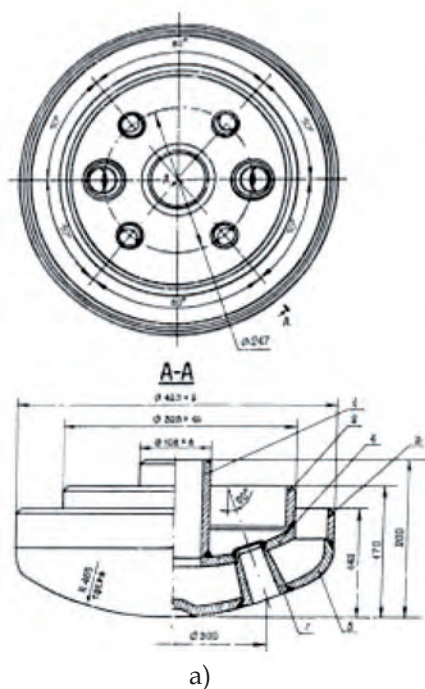


Рис. 1. Конструкция (а) и вид (б) 6-соплового наконечника гарнисажной фурмы со сгруппированными по три соплами:

- 1 – патрубок подачи охлаждающей воды; 2 – патрубок подвода азота; 3 – патрубок отвода охлаждающей воды; 4 – верхняя чаша; 5 – нижняя чаша; 6 – вкладыши с соплами Лавалья $d_{кр} = 43$ мм; 7 – вкладыши с соплами Лавалья $d_{кр} = 37$ мм

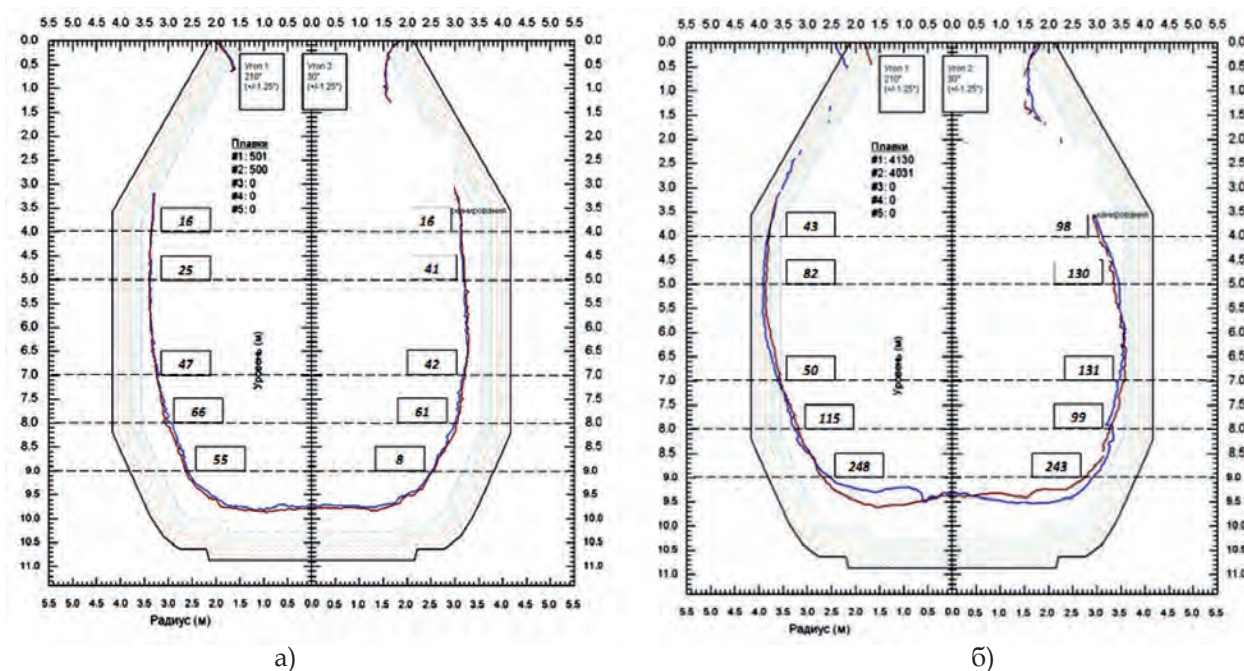


Рис. 2. Профиль рабочего пространства и распределение толщины гарнисажного слоя по высоте агрегата (мм) в первый период кампании (а) и перед остановкой (б) конвертера на перефутеровку

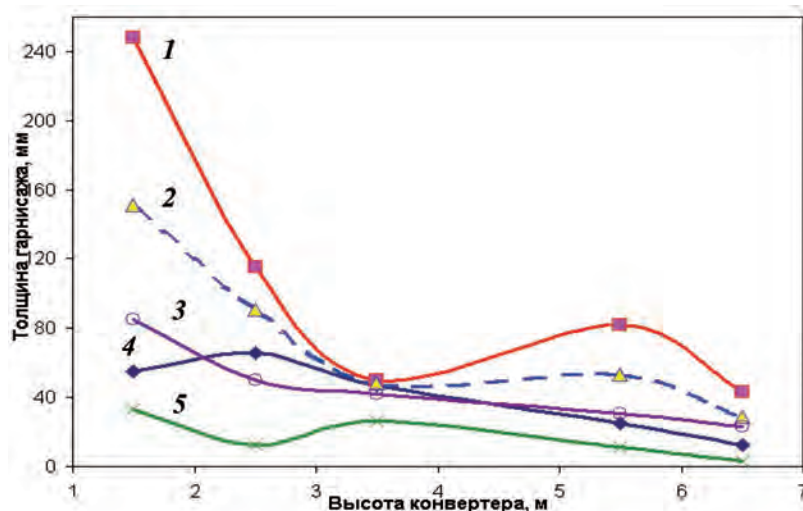


Рис. 3. Распределение толщины гарнисажного слоя по высоте конвертера:

1 – на завершающем этапе кампании; 2 – средняя; 3 – рассчитанная по методике [3]; 4 – в начальный период кампании; 5 – по результатам моделирования [4]

ет в жидкой ванне кратер, обладающий осевой симметрией и параметрами: глубиной $h_{кр}$, радиусом основания $r_{кр}$ и радиусом кривизны поверхности в нижней точке $R_{лх}$. Потoki газа, движущиеся вдоль поверхности кратера, увлекают за собой жидкость и формируют кромку, возвышающуюся над недеформированной поверхностью, что соответствует режиму «без пробоя» ванны [6]. Степень деформации поверхности ванны зависит от силы F действия струи, которая определяется скоростью газа V_0 .

Для установления связи между $h_{кр}$ и V_0 различными авторами предложено использовать энергетический баланс [7]; равенство давлений газовой и жидкой фаз на поверхности их разде-

ла [8]; баланс сил на поверхности раздела фаз [9]. В данных условиях возможность использования энергетического баланса требует обоснования, так как после достижения установившегося режима, при котором форма поверхности ванны остается постоянной, кинетическая энергия струи уже не переходит в потенциальную энергию деформации поверхности. Возможность использования равенства давлений газовой и жидкой фаз на поверхности раздела [8] в случае турбулентных струй также требует дополнительной оценки, так как не согласуется с теоремой о сохранении количества движения. Скорость V_0 газа при турбулентном режиме течения уменьшается по оси струи по мере удаления от соп-

ла и снижением давления, оказываемого струей на преграду. При этом количество движения в струе остается постоянным, и интенсивность воздействия не должна изменяться. В теории газовых струй [10] и гидравлике [11] для определения силового действия струй применяют теорему о сохранении количества движения. Единственным подходом, который не противоречит этой теореме, является использование баланса сил на поверхности раздела фаз [9].

Определим величину давления азотной струи на шлаковую ванну глубиной $h_{ш}$ в соответствии с [3]:

$$h_{ш} = 0,04T \cdot m / (\pi D^2 \cdot \rho_{ш}), \quad (1)$$

где D – диаметр конвертера, м, $D = 0,316 \cdot T^{1/2}$; T – садка конвертера, т; m – % шлака от садки; $\rho_{ш}$ – плотность шлака, кг/м³.

Для 6-сопловой фурмы (рис. 1) давление азота (P_{N2}) перед соплами Лавалья ($d_{кр} = 0,043$ м; $d_{кр} = 0,037$ м при рабочем расходе азота 600 м³/мин) составит 0,99 МПа. Плотность азота перед соплами Лавалья:

$$\rho_{N2}^{\theta x} = \rho_{N2} \frac{T_0 \cdot P_{N2}}{P_0 \cdot T_{N2}^{\theta x}} = 12,59 \text{ кг} / \text{м}^3, \quad (2)$$

где P_{N2} – плотность азота (1,25 кг/м³); P_0 – атмосферное давление, Па; T_0 – температура азота перед соплами, К.

При критической скорости истечения азота

$$W_{кр} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1}} R \cdot T_{N2}^{\theta x} = 315,8 \text{ м} / \text{с}. \quad (3)$$

(R – газовая постоянная $\left(\frac{8319}{\mu}\right)$, н·м/кг·К; μ – молекулярная масса газа; $\kappa = 1,4$ – показатель адиабаты) максимальная скорость азота на срезе сопла Лавалья с учетом критерия скорости истечения (1,58) составит:

$$W_{вых}^{\max} = W_{кр} \circ \lambda_{\max} = 500,3 \text{ м} / \text{с}. \quad (4)$$

Максимальный массовый расход азота через сопла Лавалья $d_{кр} = 0,043$ и $0,037$ м в соответствии с [12] составит 2,739 и 1,755 кг/с соответственно. В таком случае импульс азотной струи из сопла $d_{кр} = 0,043$ м будет иметь величину 1382,57 кг·м/с², а для $d_{кр} = 0,037$ м – 885,86 кг·м/с².

Силу давления газовой струи на поверхность шлаковой ванны можно определить по выражению:

$$F = k \cdot S \cdot V_x^2 \cdot \rho_{\nu}, \quad (5)$$

где k – коэффициент, зависящий от условий столкновения ($\kappa = 2$); Q – объемный расход газа, м³/с; V_x – скорость струи на уровне поверхности

столкновения с жидкой ванной, м/с; ρ – плотность струи, кг/м³; S – площадь поперечного сечения струи в месте столкновения, м².

При воздействии струи газа на жидкость энергия главным образом затрачивается на: образование новой поверхности; преодоление сил вязкости при изменении формы жидкости; потери, обусловленные неэффективной передачей энергии.

При кинетической энергии струи, истекающей через одно сопло Лавалья $d_{кр} = 0,043$ м: $E_{кин} = 1/2 m \cdot V^2 = 38883,18$ Дж, и $E_{кин} = 9915,5$ Дж для сопла с $d_{кр} = 0,037$ м, на образование поверхности раздела «газ – шлак» потребуется энергии не более $E_{нов} = S \cdot \sigma = 1,4179$ Дж. Остальная часть энергии расходуется на дробление объема шлака и вынос капель из реакционных зон.

Скорость струи на уровне поверхности ванны зависит от высоты расположения фурмы h_{ϕ} над днищем:

$$V_x = 8,26 \cdot V_0 / \left(\frac{h_{\phi}}{2r_0} \right)^{1,137} \text{ при } \frac{h_{\phi}}{2r_0} > 12, \quad (6)$$

$$V_x = V_0 \cdot [1 - 0,008 \cdot \left(\frac{h_{\phi}}{2r_0} \right)^{1,67}] \text{ при } \frac{h_{\phi}}{2r_0} < 12, \quad (7)$$

где r_0 – радиус сопла, м.

Глубина проникновения струи азота в ванну определяется как:

$$h_{кр} = \sqrt{\frac{\rho_{\nu}}{8\rho_{ш}}} \cdot V_x \cdot \sqrt{2r_x}, \quad (8)$$

где $r_x = r_0 + h_{\phi} \cdot \tan \frac{a_1}{2}$, м; a_1 – угол раскрытия струи, град.

Диаметр струи на уровне контакта с поверхностью шлаковой ванны можно определить по формуле:

$$d_1 = d_0 \sqrt{\frac{\rho_0 V_0^2}{\rho_{\nu} V_x^2}}. \quad (9)$$

Для сопел Лавалья $d_{кр} = 0,043$ и $0,037$ м диаметр струи d_1 составит 0,287 и 0,303 м соответственно, а глубина внедрения струи в ванну (например, при $h_{\phi} = 1$ м) будет равен 0,516 и 0,336 м соответственно.

В таком случае диаметр кратера реакционной зоны определяется как:

$$D = 4a \sqrt{1 - \left(\frac{a}{R_0} \right)^2}, \quad (10)$$

где $a = d_1 \left(\frac{V_0}{V_x} - 1 \right) \sqrt{\frac{3\rho_0}{2\rho_{\nu}}} = 1,43$ м. Здесь $R_0 = \frac{1}{2} \left(h - a + \sqrt{(h-a)^2 + 8a^2} \right)$.

Поверхность взаимодействия реакционной зоны с азотной струей составит $S = 8\pi a^2 \ln \frac{R_0}{a} = 2,8359 \text{ м}^2$.

Определение необходимой для нанесения гарнисажного слоя длительности раздувки ванны в данной работе проводили с учетом предположения, что с поверхности образованной струей реакционной зоны может сдуваться слой шлаковой пленки толщиной δ_n от 0,4 до 3 мм [3]. Последняя разбивается потоком газа на капли диаметром d_{ck} и переносится на ограниченную сектором S_C поверхность футеровки конвертера с радиусом R_k . При этом S_C определяется количеством сопел фурмы, а высота нанесения каплей шлака (ΔH) в соответствующем секторе – углом наклона сопел к вертикальной оси фурмы (α_1). В таком случае $\Delta H = H_{max}^{встр} - H_{min}^{встр}$, где $H_{max}^{встр} = (R_k - h_{\phi} \cdot \text{tg} \alpha_1) \cdot \text{tg} \beta_1$; β_1 – угол отражения капли от поверхности.

Принимаем $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ в качестве углов наклона сопел и отражения капель шлака без учета и с учетом угла расширения газовой струи соответственно.

С учетом приведенного выше ширину диапазона соответствующего сектора нанесения шлаковых капель по высоте агрегата можно определить по выражению:

$$\Delta H = (R_k - h_{\phi} \text{tg} \alpha_1) \text{tg} \beta_1 - (R_k - h_{\phi} \text{tg} \alpha_2) \text{tg} \beta_2, \quad (11)$$

а S_C при условии равномерного расположения сопел по окружности наконечника, как:

$$S_C = \frac{\pi}{2} R_k [R_k (\text{tg} \beta_1 - \text{tg} \beta_2) - h_{\phi} (\text{tg} \alpha_1 \text{tg} \beta_1 - \text{tg} \alpha_2 \text{tg} \beta_2)]. \quad (12)$$

После соответствующих преобразований выражение для определения площади ошлакованного сектора (S_C) как результата взаимодействия с ванной одной азотной струи можно представить в виде $S_C = \frac{\pi}{2} R_k A$, где $A = R_k (\text{tg} \beta_1 - \text{tg} \beta_2)$.

Толщина нанесенного в пределах S_C за время полета шлаковой капли диаметром d_{ck} к поверхности футеровки шлакового слоя составит:

$$\delta_{нач} = \frac{1}{2} \frac{d_{ck}^2 \cdot \delta_n}{R_k \cdot A}. \quad (13)$$

С учетом общего объема капель, образующихся в реакционной зоне, толщина гарнисажа, нанесенного на поверхность соответствующего сектора футеровки, за период раздувки в 1 с может быть рассчитана по выражению, м:

$$\delta_{шл} = \frac{2r_{кр} \left(\sqrt{h_{кр}^2 + r_{кр}^2} \right)}{R_k^2 (\text{tg} \beta_1 - \text{tg} \beta_2) (R_k - h_{\phi} \text{tg} \alpha_1) \text{tg} \beta_1}. \quad (14)$$

В соответствии с расчетами по выражению (14), при расположении фурмы (рис. 1) на высоте 4 м от уровня днища конвертера, для нанесения на сектор S_C слоя гарнисажа толщиной 50 мм необходимая продолжительность раздувки составит 3,3 мин. При расположении фурмы на высоте 0,5 м толщина покрытия в 50 мм может быть обеспечена раздувкой ванны длительностью 5,9 мин. Расчетная толщина слоя в соответствующих конструкции и положению фурмы над днищем секторах футеровки представлена на рис. 4.

Необходимо учесть, что по высоте каждого сектора S_C толщина полученного гарнисаж-

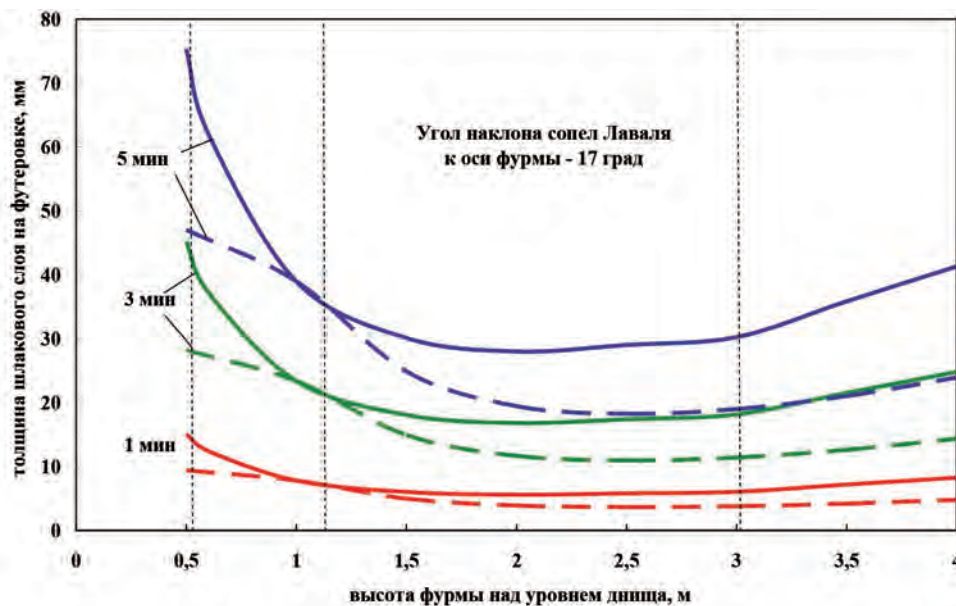


Рис. 4. Зависимость толщины гарнисажного слоя в соответствующем секторе футеровки от продолжительности раздувки шлаковой ванны и H_{ϕ} (для сопел Лавалия $d_{кр} = 43 \text{ мм}$ (—) и 37 мм (---)). Вертикальными линиями отмечены рабочие высоты фурмы (рис. 1) при раздувке шлака в условиях конвертерного цеха ПАО «ДМКД»

ного слоя неравномерна. Так, например, в соответствии с расчетами, при расположении фурмы (рис. 1) на высоте 4 м слой толщиной 50 мм в верхней точке сектора будет сформирован в течение 4,52 мин, а в нижней части всего за 2 мин. Таким образом, как и в производственных условиях (рис. 3), толщина сформированного слоя гарнисажа в нижней части сектора S_c за один и тот же временной отрезок операции будет больше, чем в верхней.

Выводы

Прямыми замерами с использованием интерферометра установлен характер распределения толщины гарнисажного слоя по высоте конвертера, полученного путем раздувки шлаковой ванны азотными струями в различные периоды кампании агрегата по футеровке. Предложена методика расчета требуемой продолжительности раздувки шлаковой ванны и положения фурмы над днищем конвертера.

Библиографический список

1. Лисняк Р. В. Физико-технологические процессы взаимодействия газовых и газопорошковых струй со шлаковой ванной во время нанесения шлакового гарнисажа на футеровку кислородного конвертера / Р. В. Лисняк, И. С. Долгополов, Е. Н. Сигарев // Теория и практика металлургии. – 2012. – № 5/6. – С. 41–45.
2. Суворов С.А. Динамика образования гарнисажного слоя на поверхности футеровки конвертера и ресурс его эксплуатации / С. А. Суворов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. – № 7–8. – С. 3–6.
3. Охотский В.Б. Гидродинамика набрызгивания шлака на футеровку конвертера / В. Б. Охотский // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 7. – С. 89–91.

4. Протопопов Е. В., Р. С. Айзатулов, А. Г. Чернятевич // Известия вузов. Черная металлургия. – 1997. – № 4. – С. 14–17.

5. Сигарев Е. Н. Модернизация гарнисажной фурмы для ошлакования футеровки / Е. Н. Сигарев, Н. Н. Недбайло, Р. В. Борщевский // Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. – Вип. 1(24). – С. 7–13.

6. 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.

7. Rosler R. S., Stewart G. H. // J. Fluid. Mech. – 1968. – Vol. 31, pt. 1. – P. 163–174.

8. Labus T. L., Aydelott J. C. NASA technical note TN D-6368.1971 // NASA technical reports server. – URL: <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp>

9. Гребенникова Н. М., Мордасов М. М. // Вестник ТГТУ. – 2005. – Т. 11. – № 1А. – С. 81–87.

10. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. Изд. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Наука, 1979. – 536 с.

11. Чугаев Р.Р. Гидравлика / Р. Р. Чугаев. – изд. 4-е, перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

12. Новые технологические режимы нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера / А.Г. Чернятевич, Е.Н. Сигарев, И.В. Чернятевич [и др.] // Теория и практика металлургии. – 2011. – № 5–6. Ч. II (83–83). – С. 19–27.

Поступила 30.03.2016

