

КОНТРОЛЬ ЗАМЕТАЛЛИВАНИЯ ФУРМЫ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА

Д.т.н., проф. В. С. Богушевский, В. Ю. Сухенко

Национальный технический университет Украины

“Киевский политехнический институт”

У даній статті розглядаються способи визначення заметалювання зовнішньої сторони кисневої фурми під час конвертерної плавки. Визначенні п'ять основних гідродинамічних режимів взаємодії кисневих потоків з конвертерною ванною. Встановлено, що найбільш раціональним способом, є спосіб визначення заметалювання фурми контролюючи тепловий потік на водоохолоджувальні елементи. Наведений пристрій за допомогою якого визначають тепловий потік.

Paper represents the methods of determination of formation of metallic crust on the surface of oxygen nozzle during the oxygen blow melting of steel. Five different hydrodynamic modes were determined during interaction of the oxygen streams with molten steel. It was established that the most perspective rational method, there is a method of determination of formation of steel crust on the surface of oxygen nozzle, controlling a thermal stream on elements, which cool down water. The heat flux is defined by means of the special device.

Отсутствие в период интенсивного обезуглероживания ванны достаточного по высоте слоя вспененного шлака, способного перекрыть торец наконечника кислородной фурмы, особенно в условиях “малошлаковой” технологии продувки, сопровождается интенсивным выносом за пределы реакционной зоны мелких капель металла и шлака с формированием настывлей на поверхности фурмы, конусной части футеровки и горловине конвертера, экранных поверхностях котла утилизатора. Удаление настывлей является трудоемкой операцией, сопряженной со снижением стойкости оборудования и потерей производительности агрегатов.

В работе [1] была произведена оценка влияния основных гидродинамических режимов взаимодействия многоструйного кислородного дутья с конвертерной ванной на интенсивность заметалливания поверхности кислородной фурмы. В результате проведенных экспериментов установлены пять основных

гидродинамических режимов взаимодействия кислородных струй с железом углеродистым расплавом без шлакового покрытия.

I – режим стабильных, обособленных или соприкасающихся по внешним границам открытых кратеров эллипсоидной формы, образуемых каждой из внедряющихся в расплав наклонных кислородных струй. Механизм брызгоуноса – разрушение гребня катящейся волны на крае кратера (рис. 1, а).

II – режим подвижных, соприкасающихся по внешним границам открытых кратеров эллипсоидной формы с усилением процесса турбулизации стенки кратера в направлении воздействия отраженного кислородного потока и возникновением дополнительного брызгоуноса путем разрушения гребней движущихся волн во внутренней полости кратера (рис. 1, б).

III – режим “зажигания”, связанный с формированием высокоразвитой реакционной поверхности контакта капель металла с кислородом в каждом из кратеров открытой формы из-за попадания брызг и крупных всплесков металла в зону действия каждой кислородной струи, последующего их дробления и сжигания с вовлечением продуктов реакции в основную ванну, что способствует повышению температуры реакционной зоны до 2000–2500°C. В данном режиме брызгоунос перед непосредственным “зажиганием” преимущественно происходит по механизму подрезания гребней волн на внутренней поверхности и крае кратера (рис. 1, в) с направленным выбросом частиц металла навстречу кислородным струям без попадания на поверхность фурмы.

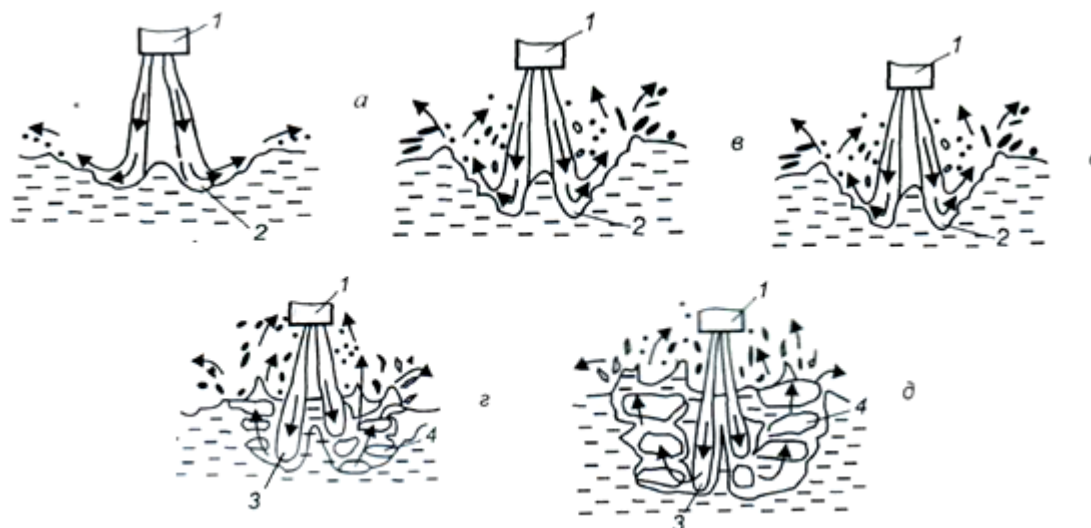


Рис. 1. Схема взаимодействия наклонных струй с железом углеродистыми расплавами в режимах I – V:

1 – двухсопловая кислородная фурма; 2 – открытые кратеры; 3 – струйные участки первичных реакционных зон; 4 – макропузыри монооксида углерода.

IV – режим глубокого проникновения кислородных струй в расплав, характеризующийся интенсивным вовлечением объемов металла в кислородную струю в каждом из кратеров, развитой пульсацией реакционной зоны, схлопыванием краев отдельных кратеров и периодическим выделением из них макрообъемов монооксида углерода во время обезуглероживания ванны. Брызгоунос связан в основном с разрушением макропузырей монооксида углерода на поверхности расплава и созданием преимущественно крупных всплесков металла, направленных в сторону от фурмы, а также непосредственно на поверхность фурмы (рис. 1, з).

V – режим “жесткой” продувки, связанный с развитием интенсивного обезуглероживания ванны с активной пульсацией струйных участков первичных реакционных зон, увеличением размеров и взрывообразным выделением на поверхность ванны газовых макрообъемов со значительной интенсификацией всплескообразования и попаданием крупных всплесков металла на поверхность фурмы, направленным брызгоуносом мелких капель металла вдоль поверхности фурмы с частичным выносом за пределы горловины конвертера. Основным механизмом брызгоуноса – разрушение окружающей макропузырь монооксида углерода металлической оболочки при его выходе на поверхность расплава (рис.1, д). Естественно, в предшествующих “зажиганию” плавки режимах продувки с формированием стабильных и открытых подвижных кратеров не может быть и речи о возможном развитии заметалливания наружной трубы фурмы, так как вынос брызг за пределы реакционной зоны осуществляется в сторону стен конвертера по низковысотной траектории.

Заметалливание наружной трубы фурмы происходило только с развитием режима глубокого проникновения кислородных струй в расплав и особенно интенсифицировалось в режиме “жесткой” продувки, поскольку только в этих условиях формировался направленный брызгоунос из реакционной зоны капель металла на поверхность фурмы и горловину конвертера, в том числе с выносом за пределы рабочего пространства последнего.

Таким образом, дутьевой режим является основным фактором, определяющим заметалливание фурмы.

Интенсивность заметалливания кислородной фурмы оценивалась путем взвешивания фурмы до и после проведения эксперимента.

Такой способ определения показателя заметалливания обеспечивает статическое управление, т.е. неудачный дутьевой режим можно поменять

только по результатам текущей плавки на последующую, в то время, как и одна плавка может привести к необходимости выполнения трудоемкой операции по удалению настыва. Для контроля динамики такой способ не пригоден, так как в процессе продувки кроме силы тяжести на фурму действуют и другие силы. Контролировать массу наслоения в динамике необходимо для того, чтобы знать, что происходит с фурмой в данный момент времени и менять соответственно режим дутья.

$$m_{\phi} = m_c + m_n \quad (1)$$

где m_{ϕ} – масса фурмы, кг; m_c – статическая масса фурмы, кг; m_n – масса наслоения, кг.

Здесь

$$m_c = m_m + m_b \quad (2)$$

где m_m – масса металлической конструкции фурмы, кг; m_b – масса воды, охлаждающей фурму, кг.

Авторами [2] исследованы силы, действующие на кислородную фурму в процессе продувки конвертера. Сила тяжести фурмы компенсируется реакцией её опор, а в процессе продувки – еще архимедовой выталкивающей силой и силой реактивной тяги кислорода, вытекающего из сопел фурменного наконечника. В процессе продувки изменяется сила тяжести фурмы вследствие наслоения на ее поверхности металло–шлаковой эмульсии.

Запишем уравнение баланса сил

$$G - F_p - F_{p.t} - F_a - F_{aэр} = 0 \quad (3)$$

где G – сила тяжести фурмы, Н; F_p – реакция опор фурмы, Н; $F_{p.t}$ – сила реактивной тяги истекающего из фурменного наконечника кислорода, Н; F_a – архимедова сила, Н; $F_{aэр}$ – сила аэродинамического воздействия потока отходящего газа, Н.

Сила тяжести фурмы

$$G = (m_{\phi} + m_b + m_n)g \quad (4)$$

где $m_{\phi} + m_b + m_n$ – масса конструкции фурмы, воды, заполняющей фурму, и наслоения на наружной поверхности, кг; $g = 9,81$ – ускорение силы тяжести, м/с².

Вследствие истечения кислородного дутья из фурменного наконечника возникает сила реактивной тяги, выражаемая формулой

$$F_{p.T} = mw + (P_{\text{вых}} - P_{\text{ср.}})\Omega\alpha_1 \quad (5)$$

где $m = V\rho/60$ – массовый расход кислорода, кг/с; V – объемный расход кислорода при нормальных условиях, м³/мин; ρ – плотность кислорода при нормальных условиях, равная 1,43 кг/м³; w – скорость истечения кислорода из сопла, м/с; $P_{\text{вых}}$ – давление кислорода в выходном сечении сопла, Па; Ω – выходное сечение сопла, м²; α_1 – число сопел в фурменном наконечнике.

В конвертерном производстве стали для продувки повсеместно используются сопла Лавая, для которых можно принять $P_{\text{вых}} - P_{\text{ср}} \approx 0$. Поэтому вторым слагаемым в уравнении (5) пренебрегают.

Считаем, что потери на трение о стенки и завихрение при истечении кислорода из сопла Лавая можно компенсировать эффектом неполного расширения газа. Поэтому для расчета w используем формулу скорости истечения для обычных сопел с учетом критических параметров рабочего тела

$$w = \sqrt{\frac{2kp_1}{(k+1)\rho_1}} = \sqrt{\frac{2k}{k+1}R_yT_1} \quad (6)$$

где k – показатель адиабаты, равный для двухатомного газа 1,4; p_1 – давление кислорода на входе в сопло, кг/м³; R_y – удельная газовая постоянная, равная для кислорода 260 Дж/(кг·К); T_1 – температура кислорода перед соплом, К. Считаем, что величина T_1 соответствует температуре воды $T_{\text{в}}$, охлаждающей фурму, К.

Так как давление и плотность кислорода на входе в сопло измерить трудно, то все эти параметры контролируются перед фурмой. При этом скорость истечения можно выразить как

$$w = \sqrt{\alpha_2 p_2 / \rho_2} \quad (7)$$

где α_2 – коэффициент, кг/(м·Па·с²); p_2 – давление кислорода перед фурмой, Па; ρ_2 – плотность кислорода перед фурмой, кг/м³.

Коэффициент α_2 определяем тарировкой фурменного наконечника при истечении кислорода в свободное пространство. С учетом (6) и (7) получаем

$$\alpha_2 = \frac{2kR_yT_{\text{в}}\rho_{2*}}{(k+1)p_{2*}} \quad (8)$$

где ρ_{2*} – плотность кислорода перед фурмой, определенная при продувке в свободное пространство, кг/м³; p_{2*} – давление кислорода перед фурмой, определенное при продувке в свободное пространство, Па.

Архимедова сила

$$F_a = \rho_3 g \pi d^2 H_1 / 4 \quad (9)$$

где ρ_3 – плотность металло–шлаковой эмульсии, кг/м³; d – наружный диаметр фурмы, м; H_1 – глубина погружения фурмы в эмульсию, м.

С учетом того, что

$$\rho_3 = \alpha_3 / H_1 \quad (10)$$

и

$$H_1 = h_1 - h_2 - H \quad (11)$$

где α_3 – коэффициент пропорциональности, определяемый с учетом геометрии рабочего пространства конвертера в середине компании по футеровке, кг/м²; h_1 – уровень ванны, отсчитываемый от внутренней поверхности днища конвертера, м; h_2 – уровень ванны в спокойном состоянии, м; H – положение фурменного наконечника относительно уровня спокойной ванны, м получаем

$$F_a = 0,25 \alpha_3 g \pi d^2 [1 - (h_2 + H) / h_1] \quad (12)$$

Силу аэродинамического воздействия набегающего потока отходящего газа на фурму определяем согласно выражению

$$F_{\text{аэр}} = F_{\text{д}} + F_{\text{т}} \quad (13)$$

где $F_{\text{аэр}} = \alpha_4 \rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2 \Omega_{\text{м}} / 2$ – сила сопротивления давлению, Н; α_4 – коэффициент сопротивления давлению; $\rho_{\text{г}}$ – плотность отходящего газа, кг/м³; $w_{\text{г}}$ – скорость движения отходящего газа, м/с; $\Omega_{\text{м}} = \pi d^2 / 4$ – площадь поверхности миделевого сечения (проекция тела на плоскость, нормальную к направлению движения рабочего тела), м²; $F_{\text{т}} = \alpha_5 \rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2 \pi d^2 H_3 / 2$ – сила сопротивления трению, Н; α_5 – коэффициент сопротивления трению; H_3 – участок образующий фурмы, омываемый газом, м.

Так как поток отходящего газа соответствует дозвуковой области газодинамики, где число Маха $M \ll 1$, величиной $F_{\text{аэр}}$ можно пренебречь.

Решая развернутое уравнение (1) относительно $m_{\text{н}}$, получаем

$$m_{\text{н}} = \left\{ F_{\text{п}} + \sqrt{\frac{2V \rho R_y T_{\text{в}} \rho_{2^*} p_2}{60(k+1) p_{2^*} \rho_2}} + 0,25 \alpha_3 \pi ((d+\delta)^2 - d^2) [1 - (h_2 + H) / h_1] \right\} / g - m_{\text{ф}} - m_{\text{в}}, \quad (14)$$

Для непрерывного определения величины настыли в процессе продувки необходимо непрерывно измерять реакцию опор фурмы, например, тензометрическим датчиком, встроенным под опоры фурмы, расход и давление дутья, температуру воды, охлаждающей фурму и уровень ванны, например по акустическому сигналу продувки.

Мы предлагаем более простой метод контроля настылеобразования на фурму.

Из теории нестационарной теплопроводности твердого тела известно, что при тепловом воздействии на границе сходственным моментам для контролируемых точек по толщине отвечают одинаковые значения критерия Фурье, согласно которому инерционное время запаздывания температурного импульса определяется геометрическими и теплофизическими свойствами контролируемого слоя настыли.

$$\Delta\tau = \frac{x^2}{a} \quad (15)$$

где $\Delta\tau$ – момент достижения температурным импульсом внутренней поверхности настыли, с; x – глубина настыли, м; a – коэффициент теплопроводности материала настыли, м²/с.

Температурные импульсы возникают в моменты прохождения технологических операций: опускание фурмы в конвертер, ввод сыпучих материалов, изменение расстояния сопла фурмы до уровня спокойного металла в процессе продувки и др.

Начальную величину настыли определяем в момент опускания фурмы в начале продувки.

$$x_1 = \sqrt{a\Delta\tau_1} \quad (16)$$

По ходу продувки при резком изменении температурного режима величина настыли изменится на величину δ и составит

$$x_2 = \sqrt{a\Delta\tau_2} \quad (17)$$

Здесь $x_2 = x_1 + \delta$.

Величина наслоения находится из соотношения

$$\frac{x_1}{x_1 + \delta} = \sqrt{\frac{\Delta\tau_1}{\Delta\tau_2}} \quad (18)$$

и составляет

$$\delta = x_1 \left(\sqrt{\frac{\Delta\tau_1}{\Delta\tau_2}} - 1 \right) \quad (19)$$

Моменты прохождения тепловых импульсов предлагается контролировать по характеру изменения температуры воды, охлаждающей фурму. При этом контролируется время запаздывания изменения температуры воды, охлаждающей фурму, при резком изменении температурного режима в конвертере, соответствующее средней величине δ по всей поверхности фурмы, находящейся в конвертере.

Литература

1. Мокринский А.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Гидродинамические режимы взаимодействия кислородных струй с конвертерной ванной // Изв. вуз. Черная металлургия, 2005. – №4. – С.11 – 17.

2. Богушевский В.С., Рюмшин Н.А., Сорокин Н.А. Основы математического описания технологических процессов конвертерного производства стали. – К.: НПО “Киевский институт автоматики”, 1992. – 168 с.

3. Богушевский В.С., Рюмшин Н.А., Сорокин Н.А. АСУ ТП производства стали в конвертерах. – К.: Техника, 1991. – 180 с.