

Чернятевич А. Г. /д. т. н./
ИЧМ НАНУ

Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 2

На основе результатов высокотемпературного моделирования и промышленных исследований выданы методика проектирования и технические решения конструкций головок двухконтурных кислородных фурм, рекомендации по дутьевому и шлаковому режимам ведения конвертерных плавков с их использованием, обеспечивающие улучшение технико-экономических показателей кислородно-конвертерного процесса. Ил. 5. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: высокотемпературное моделирование, конвертерная плавка, двухконтурная кислородная фурма, режим продувки, технико-экономические показатели

On the results of high-temperature modeling and industrial research a technique of designing and technical solutions of improved tips design of double-line oxygen lances are given as well as the blowing and slag regimes recommendations for converter melting process with the use of these lance-tips that provide better technical and economic indicators of the BOF process.

Keywords: high-temperature modeling, converter melting, double-line oxygen lance, blowing regime, technical and economic indicators

При выбранной металлошихтовке конвертерной плавки на дальнейший ход последней при верхней кислородной продувке основное влияние оказывают известные управляющие воздействия [1]:

- конструкция применяемой головки кислородной фурмы;
- расход кислорода (Q_{O_2} , м³/мин), начальная ($H_{ф}^{нач}$, м) и рабочая ($H_{ф}^{раб}$, м) высота расположения фурмы над уровнем металлической ванны в спокойном состоянии;
- режим присадок по ходу продувки после заливки чугуна углеродсодержащих теплоносителей и шлакообразующих материалов (извести, плавикового шпата, магнезиальных модификаторов и др.).

Даже в тех конвертерных цехах, где соблюдаются вполне одинаковые исходные условия работы агрегатов, каждая плавка имеет свой собственный индивидуальный характер протекания. В случае отклонения от нормального хода продувки (задержка «зажигания» плавки и формирования жидкого шлака, возникновение интенсивных выбросов и выносов) дистрибьюторщик вынужден для исправления хода операции корректировать положение фурмы, расход кислорода и режим присадок сыпучих материалов.

В характерных для большинства конвертерных цехов условиях, когда в ходе кампании существенно колеблются исходные параметры начала плавки (температура футеровки и разме-

ры рабочего пространства агрегата, качество заваляемого металлического лома, температура и состав заливаемого чугуна), а продувка ванны осуществляется с принятым расходом кислорода (Q_{O_2}) через обычную многосопловую фурму, снабженную головкой с круговым расположением 4-6 сопел Лавалья под углом $\alpha = 15-20^\circ$ к вертикали, не всегда удается обеспечить:

- ускоренный и стабильный процесс шлакообразования с наведением с самого начала продувки жидкоподвижного основного окислительного шлака с надлежащей фосфор- и серопоглолительной способностью;
- спокойный без выбросов и выносов характер продувки конвертерной ванны в режиме «заглубленных» кислородных струй при расположении уровня вспененного шлака выше среза головки фурмы на протяжении преобладающей части времени операции;
- надлежащее дожигание CO до CO₂ в полости конвертера для улучшения теплового баланса плавков, особенно в случае «холодной» шихтовки последних;
- предотвращение интенсивного заметалливания ствола кислородной фурмы, горловины конвертера и экранной поверхности камина;
- более интенсивное перемешивание конвертерной ванны на окончательной стадии продувки и минимальную окисленность конечного железуглеродистого ($\leq 0,08\%$ C) полупродукта при оптимальном содержании оксидов железа в шлаке.

В таких условиях оптимальное с металлургической точки зрения протекание конвертерного процесса может быть достигнуто лишь в том случае, если для верхней продувки будут задействованы фурмы, обеспечивающие при фиксированном положении ($H_{\text{ф}}^{\text{раб}}$, м) одновременно «жесткий» и «мягкий» характер воздействия кислородных струй на ванну с необходимым перераспределением вдуваемого кислорода на реакции в металлической, шлаковой и газовой фазах рабочего пространства конвертера.

В этом направлении действенным мероприятием, по мнению автора, является оснащение конвертеров двухконтурными фурмами [2] и системами подвода к ним двух регулируемых потоков основного и дополнительного кислорода с возможностью полной замены их на нейтральный газ (рис. 1). Это позволит:

- обеспечить возможность регулирования в ходе операции расхода основного кислорода ($Q_{\text{O}_2}^{\text{осн}}$, м³/мин), предназначенного для формирования с помощью сопел Лавалья сверхзвуковых кислородных струй, обеспечивающих «жесткую» продувку ванны в режиме глубокого проникновения с интенсификацией растворения лома, обезуглероживания и перемешивания металлического расплава, а также дополнительного кислорода ($Q_{\text{O}_2}^{\text{доп}}$, м³/мин), направленного на организацию «мягкой» продувки дозвуковыми кислородными струями, истекающими из цилиндрических сопел, способствующей ускоренному наведению жидкоподвижного шлака и дополнительному дожиганию СО в полости конвертера с улучшением теплового баланса плавки;

- более гибко управлять состоянием вспененного слоя шлакометаллической эмульсии с целью предотвращения выбросов, повышения эффективности удаления фосфора и серы;

- снизить интенсивность заматливания ствола фурмы и горловины конвертера за счет создания над реакционной зоной взаимодействия основных сверхзвуковых кислородных струй с конвертерной ванной своеобразной газовой завесы из дополнительного кислородного или азотного дутья, преграждающего попадание на ствол фурмы и горловину конвертера капель металла, выносимых во встречном потоке отходящих газов;

- в результате формирования с помощью дополнительных сопел значительной по объему области с относительно низкоскоростными многоструйными кислородными потоками, обеспечить дожигание выделяющегося СО до СО₂ ниже уровня ванны в пределах специально создаваемых реакционных зон с передачей тепла непосредственно расплаву без воздействия

образующегося высокотемпературного факела на футеровку конвертера;

- за счет замены дополнительного кислорода на нейтральный газ (азот, аргон) с определенным расходом в заключительный период операции обеспечить при высоте фурмы $\leq H_{\text{ф}}^{\text{раб}}$ «жесткую» кислородную и «мягкую» продувку нейтральным газом, направленную на снижение окисленности металла и шлака при глубоком «передуве» ($\leq 0,08$ % С) ванны в случае выплавки низкоуглеродистых марок стали;

- реализовать раздув конечного шлака с целью нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера сверхзвуковыми струями с максимальной подачей азота через сопла Лавалья при расходе азота через цилиндрические сопла на уровне, обеспечивающем предотвращение «запечатывания» их брызгами шлака.

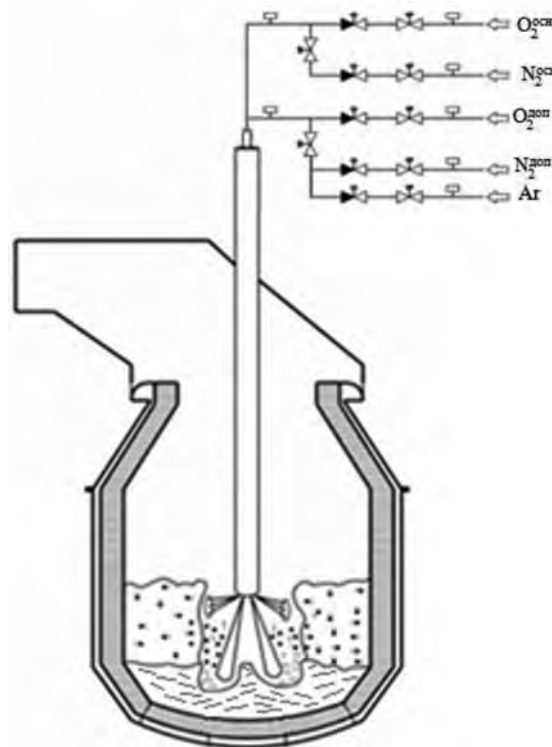


Рис. 1. Схема реализации верхней продувки конвертерной ванны с использованием двухконтурной фурмы и модернизированной системы подвода к ней технологических газов

Для разработки новых конструкций двухконтурных фурм, обеспечивающих перечисленные дополнительные технологические приемы управления ходом продувки конвертерной плавки, с использованием отработанной методики высокотемпературного моделирования [1, 3] были исследованы гидрогазодинамические особенности одновременной продувки конвертерной ванны разноимпульсными кислородными струями, истекающими из различных конструкций головок (табл. 1).

Таблица 1

Конструктивные параметры головок лабораторных двухконтурных фурм

Номер головки	Ряд основных сопел				Ряд дополнительных сопел			
	$n_{в'}$ шт.	$d_{в'}$ мм	$\alpha_{в'}$ град.	$D_{в'}$ мм	$n_{н'}$ шт.	$d_{н'}$ мм	$\alpha_{н'}$ град.	$D_{н'}$ мм
№ 14	4	1,7	15	17	8	0,6	20	32
№ 15	4	1,7	15	17	12	0,4	25	36
№ 8	3	2,0	10	18	6	1,0	25	28
№ 12	3	2,0	7	14	8	0,5	25	26

Головки с круговым двухрядным расположением цилиндрических сопел (табл. 1) отличались количеством основных ($n_{в'}$) и дополнительных ($n_{н'}$) сопел в контурах, их диаметрами ($d_{в'}$, $d_{н'}$) и углами наклона к вертикальной ($\alpha_{в'}$, $\alpha_{н'}$) оси фурмы, а также диаметрами окружности расположения осей выходных сечений сопел ($D_{в'}$, $D_{н'}$) на торце головки.

В данном случае группой основных сопел (3 или 4 сопла) внутреннего контура при расходе кислорода через них 70-90 % от общего стремились организовать разделение или объединение выходящих из реакционных зон воздействия кислородных струй на ванну потоков CO, а встречно направленными дополнительными струями, формируемыми 6-12-ю соплами наружного контура, создавать своеобразную завесу на пути выноса капель металла и шлака при

одновременном дожигании CO до CO₂ с передачей выделяющегося тепла непосредственно расплаву.

Поставленная задача была реализована без особых осложнений. С момента устойчивого «зажигания» операции при продувке ванны 9-ти (№ 8) и 12-ти (№ 14) сопловыми двухконтурными фурмами обеспечивались при малой толщине вспененного шлака условия раздельного выхода на поверхность ванны макропузырей монооксида углерода из обособленно расположенных реакционных зон взаимодействия трех или четырех основных кислородных струй с расплавом (рис. 2). При этом фиксируется дожигание выделяющегося CO, дробление и сжигание попадающих в дополнительные кислородные струи капель металла (рис. 2).

Продувка ванны с применением 12-ти и 16-ти сопловых головок (№ 14, 15) сопровождалась существенным снижением интенсивности направленного брызговыноса мелких капель металла и шлака на поверхность наружной трубы фурмы в условиях малошлаковой продувки.

При значительном перекрытии вспененным шлаком среза головки 9-ти сопловой фурмы наблюдался прерывистый выход макрообъемов CO на поверхность ванны в виде крупных пузырей (рис. 2б), сопоставимых с размерами отдельной реакционной зоны.

С применением 11-ти сопловой (№ 12) двухконтурной фурмы удавалось создавать (рис. 3),

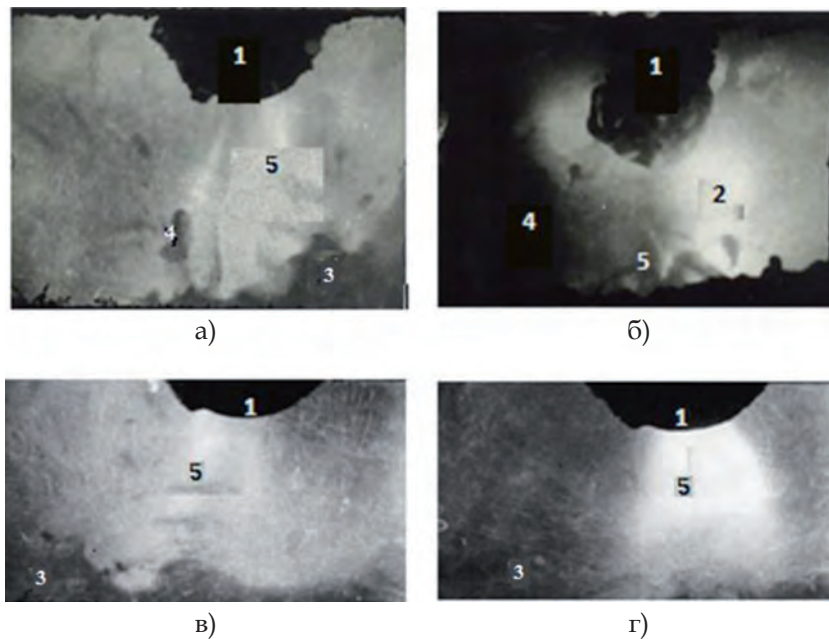


Рис. 2. Картина продувки конвертерной ванны в начале операции через 9-ти (а, б) и 12-ти (в, г) сопловые двухконтурные фурмы с расходом основного ($q_{O_2}^{осн} = 2,2 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$) и дополнительного ($q_{O_2}^{доп} = 0,22 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$) кислорода при $N_{ф}^{раб} = 60$ калибров. Здесь и на рис. 3: 1 – головка фурмы; 2 – выход CO на поверхность ванны; 3 – поверхность шлака; 4 – всплески металла и шлака; 5 – дожигание CO и сжигание капель металла в струях

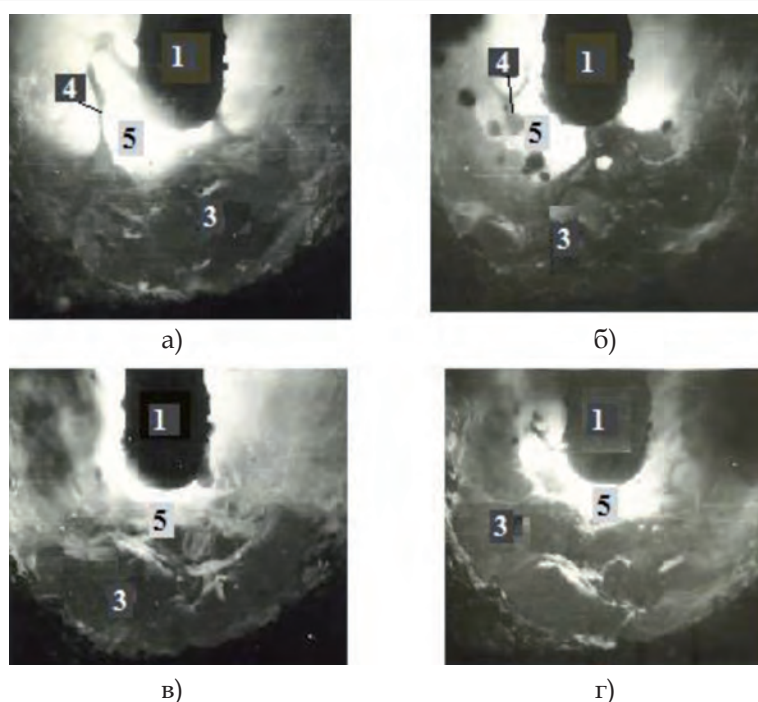


Рис. 3. Картина окончательного периода продувки конвертерной ванны 11-ти сопловой двухконтурной фурмой ($H_{\text{ф}}^{\text{раб}} = 25$ калибров) с расходом $q_{\text{O}_2}^{\text{осн}} = 2,3 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$ и $q_{\text{O}_2}^{\text{доп}} = 0,24 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$

даже в окончательный период продувки, с помощью трех основных кислородных струй, подаваемых через сопла внутреннего ряда головки, общую реакционную зону (открытой формы) интенсивного выделения CO , а дополнительными кислородными струями из восьми сопел внешнего ряда дожигать CO до CO_2 в «свищевом» потоке отходящих газов.

Как и следовало ожидать, проведенная при сопоставимых условиях продувки конвертерной ванны оценка показателя (табл. 2) дожигания отходящих газов (CO_2) при использовании различных лабораторных фурм показала предпочтительность применения головок с двухрядным расположением сопел при регулируемом двухконтурном подводе кислорода.

В результате проведенного высокотемпературного моделирования была обоснована следующая методика [4] проектирования головок двухконтурных кислородных фурм.

Определяемыми конструктивными параметрами головки являются: рациональное количество сопел во внутреннем ($n_{\text{в}}$) и наружном ($n_{\text{н}}$) контурах, их форма, размеры и характер размещения; целесообразные углы наклона сопел к вертикали ($\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{н}}$) и в плане ($\varphi_{\text{в}}$, $\varphi_{\text{н}}$) между осями соседних сопел в каждом из контуров. Для нахождения этих конструктивных параметров головки прежде всего задаемся необходимыми условиями продувки конвертерной ванны: общим расходом кислородного дутья (Q_{O_2} , $\text{м}^3/\text{мин}$), перераспределением расходов кислорода между внутренней ($Q_{\text{O}_2}^{\text{осн}}$, $\text{м}^3/\text{мин}$) и

наружной ($Q_{\text{O}_2}^{\text{доп}}$, $\text{м}^3/\text{мин}$) группами сопел Лавалья и цилиндрических соответственно, а также целесообразной формой организации реакционной зоны.

Таблица 2

Усредненные показатели CO_2 дожигания отходящего газа при продувке конвертерной ванны различными фурмами ($H_{\text{ф}}^{\text{раб}} = 35$ калибров, $q_{\text{O}_2}^{\text{осн}} = 2,3 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$, $q_{\text{O}_2}^{\text{доп}} = 0,23 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$)

Содержание углерода в расплаве по ходу продувки, %	$\text{CO}_2 = 100\text{CO}_2 / (\text{CO} + \text{CO}_2)$, %			
	Номера фурм*			
	5**	15	8	12
4,0-3,5	19,4	24,3	24,5	24,9
2,0-1,5	12,4	17,2	17,3	18,7
1,0-0,5	10,6	13,9	14,2	15,8
0,2-0,1	11,3	12,9	16,5	17,2

Примечание. * - номера фурм в соответствии с табл. 1; ** - обычная 4-х сопловая головка ($d_{\text{в}} = 1,6 \text{ мм}$; $\alpha_{\text{в}} = 15^\circ$; $D_{\text{в}} = 19 \text{ мм}$)

При реализации варианта по схеме (рис. 4а) создания внутренней группой сверхзвуковых кислородных струй обособленных реакционных зон интенсивного выделения монооксида углерода на поверхность ванны с дожиганием последнего дозвуковыми струями, формируемыми цилиндрическими соплами наружного контура, максимальное число сопел Лавалья во внутреннем контуре головки ($n_{\text{в}}^{\text{max}}$) определяется по известной формуле [5]

$$n_B^{\max} = (Q_{O_2} - Q_{O_2}^{\text{доп}}) / (H^1 / 0,85)^{2,34}, \quad (1)$$

где H^1 – высота рабочего пространства конвертера от уровня спокойной ванны, м.

В случае планируемой работы конвертеров с глубоким «передувом» плавки ($[C] < 0,08 \%$) расчетное количество сопел (n_B^{\max}) следует уменьшить, как показали материалы производственных испытаний, на одно (в диапазоне расхода кислорода $Q_{O_2}^{\text{очн}} = 300-500 \text{ м}^3/\text{мин}$) или на два (при $Q_{O_2}^{\text{очн}} = 700-1100 \text{ м}^3/\text{мин}$), чтобы обеспечить более «жесткий» характер продувки на окончательной стадии операции с целью снижения окисленности металла и шлака. Расчет профиля сопла Лаваля в данном случае ведется с условием истечения кислородных струй в режиме недорасширения в заданном диапазоне расхода основного кислорода, чтобы снизить интенсивность износа кромок сопел.

Разведение реакционных зон интенсивного выхода монооксида углерода на поверхность ванны достигается [1] путем предотвращения слияния в глубине расплава струйных участков первичных реакционных зон максимального диаметра ($D_{I\max}$), что обеспечивается при выполнении соотношения

$$\tan \frac{\varphi_B}{2} = \frac{D_{I\max} - a}{2(H_{\Phi}^{\text{раб}} + L)}. \quad (2)$$

Здесь a – минимальное расстояние между осями сопел внутреннего контура на торце головки, м; $L = 0,5L_{I\min}$ – длина струйного участка первичной реакционной зоны, на котором струйный участок достигает максимального диаметра, м.

Значения рабочей высоты фурмы над уровнем ванны $H_{\Phi}^{\text{раб}}$, минимальной длины $L_{I\min}$ и

максимального диаметра $D_{I\max}$ первичной реакционной зоны при выбранном расходе кислорода $Q_{O_2}^{\text{очн}}$ определяются из выражений

$$H_{\Phi}^{\text{раб}} / d_{\text{вых}} = 37,2 \left(\sum i_{O_2}^{\text{очн}} / mg \right)^{0,092}; \quad (3)$$

$$L_{I\min} (H_{\Phi} + L_{I\min})^2 = 75,1 \frac{i_{O_2}^{\text{очн}}}{\rho_M g \cos \alpha}; \quad (4)$$

$$D_{I\max} = 3,09 \sqrt{\frac{i_{O_2}^{\text{очн}}}{\rho_M g L_{I\min}}}, \quad (5)$$

в которых $d_{\text{вых}}$ – выходной диаметр сопла Лаваля, м; $i_{O_2}^{\text{очн}}$ и $\sum i_{O_2}^{\text{очн}}$ – импульсы одиночный и суммарный основных кислородных струй, Н; m – масса жидкого металла, кг; g – ускорение силы тяжести, м/с²; ρ_M – плотность металла, кг/м³.

При найденном значении φ_B величина α_B определяется из соотношения

$$\sin \alpha_B = \frac{\sin(\varphi_B / 2)}{\sin(180^\circ / n_B)}. \quad (6)$$

В том случае, когда ставится задача создания внутренней группой основных кислородных струй объединенной реакционной зоны со «свищевым» общим выходом монооксида углерода на поверхность ванны (рис. 4б), необходимые значения углов φ_B и α_B находятся из вышеприведенных выражений (2-6) с учетом соприкосновения в глубине расплава струйных участков первичных реакционных зон с минимальным диаметром $D_{I\min}$, определяемым из уравнений

$$D_{I\min} = 2,68 \sqrt{\frac{i_{O_2}^{\text{очн}}}{\rho_M g L_{I\max}}}; \quad (7)$$

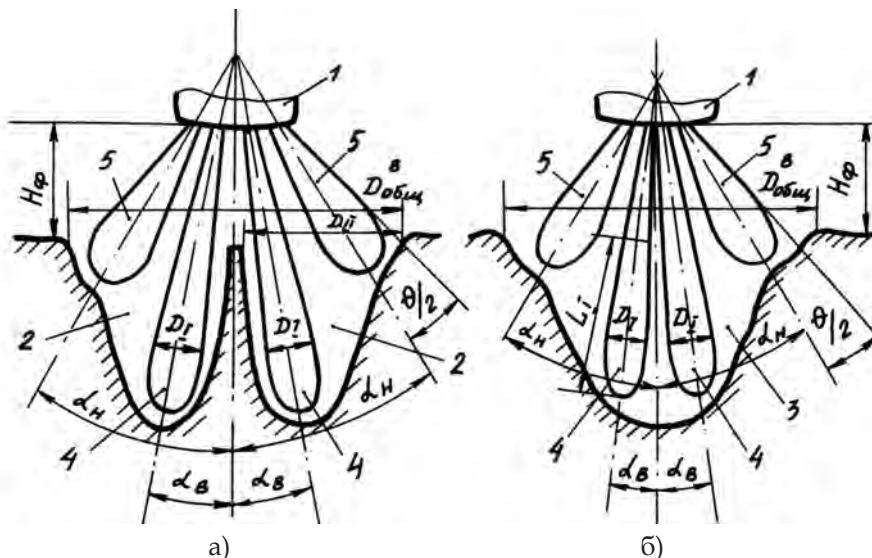


Рис. 4. Схема реакционной зоны при продувке ванны двухконтурными фурмами

$$L_{I \max} (H_{\phi} + L_{I \max})^2 = 133,3 \frac{i_{O_2}^{\text{осн}}}{\rho_M g \cos \alpha} \quad (8)$$

Рациональное количество цилиндрических сопел в наружном контуре головки, их размеры, углы наклона в плане (φ_H) и к вертикальной оси фурмы (α_H) зависят от расхода дополнительного кислорода на шлакообразование и дожигание отходящих газов и конфигурации области выхода на поверхность ванны монооксида углерода из пределов реакционной зоны, созданной основными кислородными струями. При подаче дополнительного кислорода целесообразно, с одной стороны, формировать для более эффективного дожигания конвертерных газов [4] дозвуковые кислородные потоки с расширением в них областей со скоростью 5-12 м/с, сопоставимой со скоростью перемещения фронта пламени в смеси CO-O₂. С другой стороны, необходимо обеспечить возможность некоторого внедрения факелов дожигания CO до CO₂ в пределах диаметра общей реакционной зоны ($D_{\text{общ}}^B$) с целью ускорения шлакообразования и повышения эффективности передачи выделяющегося тепла расплаву. Необходимо также обеспечить возможность подавления выноса мелких капель металла из реакционной зоны на ствол фурмы и горловину конвертера за счет создания своеобразной газовой завесы с помощью дополнительных дозвуковых кислородных или нейтральных газовых струй.

Перечисленные условия выполняются без осложнений при организации продувки конвертерной ванны и дожигания CO до CO₂ по схеме рис. 4б. В этом случае угол α_H наклона к вертикали равномерно расположены по кругу цилиндрических сопел наружного контура определяется из выражения

$$\tan \alpha_H = \frac{D_{\text{общ}}}{2H_{\phi}^{\text{раб}}} - \tan \frac{\theta_{\text{дзв}}}{2}, \quad (9)$$

где $\theta_{\text{дзв}}$ – угол раскрытия дозвуковой кислородной струи, град.

В свою очередь:

$$D_{\text{общ}}^B = 11,3H_{\phi}^{\text{раб}} \left[\frac{i_{O_2}^{\text{осн}}}{\rho_M g (H_{\phi}^{\text{раб}})^3} \right]^{0,65} (1 + L_{I \min} \text{tg} \alpha_B) + d_0 + 2 (H_{\phi}^{\text{раб}} + L_{I \min}) \text{tg} \alpha_B; \quad (10)$$

$$L_{II \min} (H_{\phi} + L_{II \min})^2 = 205,3 \frac{i_{O_2}^{\text{осн}}}{\rho_M g \cos \alpha_B}; \quad (11)$$

$$\tan \frac{\theta_{\text{дзв}}}{2} = 0,234 \rho^{-0,141}. \quad (12)$$

Здесь d_0 – диаметр окружности расположения осей выходных сечений сопел Лаваля внутреннего контура, м; $\bar{\rho}$ – отношение плотностей среды и струи.

С учетом определенных значений α_H и φ_H можно исходя из заданных размеров головки определить рациональное количество сопел в наружном контуре по формуле

$$n_H \leq \frac{180}{\arcsin \frac{D_{I \max} \cos \alpha_H - 2 (H_{\phi}^{\text{раб}} + L_{I \min}) \tan (\varphi_H / 2)}{d_H \cos \alpha_H}}, \quad (13)$$

в которой d_H – минимальное расстояние между осями цилиндрических сопел наружного контура на срезе головки, м.

Размеры цилиндрических сопел наружного контура определяются обычным способом исходя из заданного расхода дополнительного кислорода, рекомендуемого в пределах 10-30 % от общего.

В случае организации дожигания отходящих газов в пределах обособленных реакционных зон (рис. 4а) цилиндрические сопла в наружном контуре следует располагать группами с условием встречного перекрытия каждого из потоков выделяющегося монооксида углерода. При этом максимальный диаметр отдельной реакционной зоны «свищевого» выхода CO на поверхность ванны ($D_{II \max}$) определяется на основе уравнений

$$D_{II \max} = 5,81 \sqrt{\frac{i_{O_2}^{\text{осн}}}{\rho_M g L_{II \max}}}; \quad (14)$$

$$L_{II \max} (H_{\phi} + L_{II \max})^2 = 228,6 \frac{i_{O_2}^{\text{осн}}}{\rho_M g \cos \alpha}; \quad (15)$$

С учетом изложенных результатов высокотемпературного моделирования и разработанной методики проектирования головок, в свое время (на протяжении 1983-90 гг.), были созданы и проверены в широком опытно-промышленном масштабе новые конструкции двухконтурных фурм с многосопловыми го-

ловками (рис. 5), обеспечивающими продувку ванны 160-т и 250-т конвертеров Западно-Сибирского [4, 6] и Днепровского [7, 8] металлургических комбинатов соответственно. Это удалось благодаря непосредственной поддержке и помощи работников этих предприя-

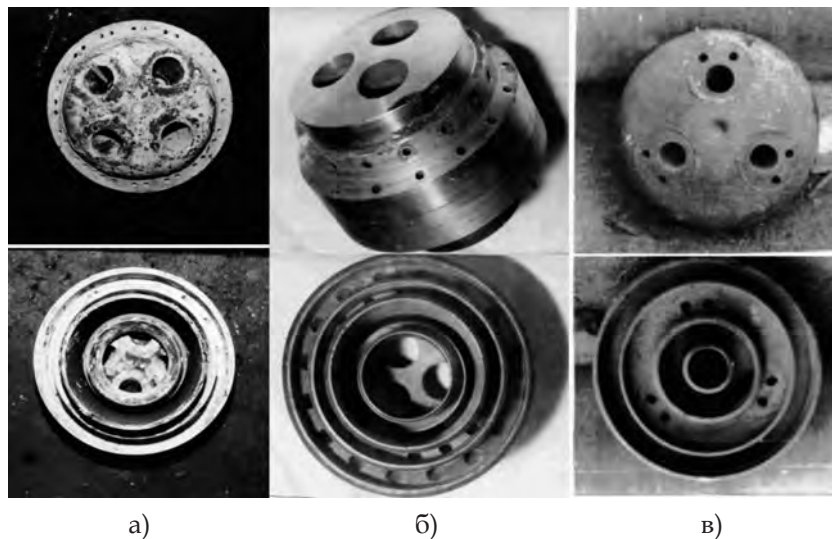


Рис. 5. Внешний вид 36-ти (а), 35-ти (б) и 9-ти (в) сопловых головок двухконтурных фурм

тий, а именно Ю. Н. Борисова, Р. С. Айзатулова, К. Г. Носова и Л. М. Учителя, которые одобрили предложения автора и оказали непосредственное содействие в ходе изготовления и испытания новых конструкций двухконтурных фурм и модернизации системы подвода технологических газов к ним, в результате чего впервые появилась возможность вести продувку конвертерной ванны сверху двумя независимо регулируемым потоками основного и дополнительного кислорода при полной или частичной замене дополнительного кислорода на нейтральный газ.

Если учесть сегодняшние условия работы конвертерных цехов Украины, то из опробованных ранее конструкций двухконтурных фурм [4, 6-8] предпочтение для дальнейшего совершенствования и внедрения следует отдать:

- двухконтурной фурме с диаметром наружной трубы 273 мм и периферийным подводом охлаждающей воды с расходом 90-120 м³/час к 36-ти сопловой головке (рис. 5а), приспособленной для продувки ванны 160-т конвертеров с расходом основного и дополнительного кислорода в пределах 350-380 и 20-50 м³/мин. В этом случае 4 сопла Лавалья внутреннего контура располагаются под углом $\alpha_{в}$ 12° или 15° с целью обеспечения объединенного (рис. 4б) или отдельных (рис. 4а) потоков выделения монооксида углерода из реакционной зоны. Внешний контур выполняется в составе 32-х цилиндрических сопел под углом $\alpha_{н}$ = 30-35°, что позволяет создать надежную завесу «мягкого» кислородного или нейтрального (азот, аргон) дутья, перекрывающую граничные контуры реакционной зоны из пределов которой осуществляется преимущественное выделение СО с брызговывосом объемов металла и шлака.

При выбранном конструктивном решении головки (рис. 5а) можно по-разному компо-

вать сопла внутреннего и внешнего контуров относительно друг друга и в широких пределах изменять число дополнительных сопел и угол ($\alpha_{н}$) их наклона. Определенные ограничения на количество дополнительных цилиндрических сопел накладывают размеры головки, определяемые диаметром наружной трубы, и площадь межсопловой пространства для прохода необходимого количества охлаждающей воды. Во всяком случае, даже при наружном диаметре трубы 219 мм, удастся без осложнений в 35-ти сопловой головке (рис. 5б) разместить 3 основных сопла Лавалья и 32 дополнительных цилиндрических сопла, расположенных двумя контурами попарно одно над другим (16 пар).

Следует отметить, что равномерное расположение по кругу в наружном контуре как можно большего количества цилиндрических сопел позволяет при данном расходе дополнительного кислорода обеспечить подавление выноса мелких капель металла и шлака из реакционной зоны на ствол фурмы и горловину конвертера, а также расширить в дозвуковой кислородной завесе области со скоростью 5-12 м/с, что важно для повышения эффективности дожигания СО до СО₂;

- двухконтурной фурме с диаметром наружной трубы 426 мм и центральным подводом охлаждающей воды с расходом 350-400 м³/час к 9-ти (рис. 5в) или 12-ти сопловой головке, приспособленной для продувки ванны 250-350-т конвертеров с расходом основного и дополнительного кислорода в пределах 900-1200 и 50-250 м³/мин. В случае 9-ти сопловой головки (рис. 5в) три сопловых блока размещены в ней с образованием внутреннего контура 3-х сопел Лавалья, расположенных под углом $\alpha_{в}$ = 15° к вертикали, и наружного контура в составе 6-ти цилиндрических сопел с углом $\alpha_{н}$ = 23°.

Отработанный на 160-т конвертерах ЗСМК режим продувки и присадки сыпучих материалов с использованием двухконтурной фурмы с 36-ти сопловой головкой (рис. 5а) был следующим. Перед заливкой чугуна на лом присаживается известь в количестве 35-40 % от требуемого на плавку расхода. Включение кислорода на продувку производится при входе фурмы в горловину и устанавливается его расход в пределах 350-370 и 30-50 м³/мин на внутренний и внешний контуры сопел соответственно.

В зависимости от характера продувки и поведения ванны начальное $H_{\text{ф}}^{\text{нач}}$ и рабочее $H_{\text{ф}}^{\text{раб}}$ положения фурмы в ходе операции корректируются относительно расчетных значений, определенных с использованием полученных выражений (16) и (3)

$$H_{\text{ф}}^{\text{нач}} / d_{\text{вых}} = 63,1 \left(\sum i_{\text{O}_2}^{\text{оч}} / \text{mg} \right)^{0,094}. \quad (16)$$

Активный жидкоподвижный шлак наводится в течение 4-5 мин от начала продувки при начальной высоте фурмы 2,3-2,5 м. Затем фурма опускается на рабочую высоту 1,4-1,6 м и фиксируется на таком уровне до 15-й – 17-й мин продувки, а на окончательной стадии операции высота фурмы составляет 1,1-1,2 м с целью предотвращения чрезмерного переокисления металла и шлака.

Последующие 25-35 % извести присаживается в течение первых 3 мин продувки. Оставшееся количество извести вводится порциями до 12-й – 14-й мин. Добавка плавикового шпата совмещается с присадкой извести на второй-третьей минутах, в последующем плавиковый шпат вводится в зависимости от характера продувки («сворачивание» шлака, появление интенсивного выноса металла из конвертера).

По истечении 16-й – 17-й мин операции изменяется соотношение расходов кислорода между внутренним и внешним контурами сопел до 380 и 20 м³/мин соответственно, а на заключительной стадии продувки дополнительный кислород заменяется азотом с расходом 10-20 м³/мин, одновременно повышается интенсивность подачи основного кислорода до 400 м³/мин.

Отработанный режим верхней продувки через двухконтурную фурму с 36-ти канальной головкой (рис. 5а) по сравнению с обычной 5-ти сопловой обеспечил повышение показателя дожигания отходящих газов СО₂ на 10-15 %, снижение расхода чугуна и извести в пределах 10,2-18,3 и 0,8-2,3 кг/т стали соответственно. При этом наблюдался практически равномерный износ футеровки конвертера по высоте, а также не фиксировалось заматывание ствола двухконтурной фурмы.

Разработанная технология дутьевого и шлакового режимов ведения плавки на 250-т конвертерах ДМК с использованием двухконтурной фурмы с 9-ти сопловой головкой (рис. 5б) имела следующие особенности. Первая порция извести (30-40 % от общего количества) загружается на лом перед заливкой чугуна. Уголь в количестве 1-2 т присаживается в конвертер после заливки чугуна. При входе фурмы в горловину конвертера расход основного кислорода устанавливается 800-900, а дополнительного – 100-120 м³/мин. После устойчивого «зажигания» плавки в течение первых 3-4 мин продувки производится плавное опускание фурмы с начальной 2,3-2,5 м до рабочей высоты 1,3-1,5 м. Остальная часть извести присаживается со 2-й по 5-ю мин продувки. Добавки плавикового шпата вводятся в зависимости от хода шлакообразования и поведения ванны при продувке.

Перед началом падения факела над горловиной конвертера, что происходит при достижении содержания углерода в металле 0,12-0,15 %, производится замещение дополнительного кислорода на азот с расходом 15-20 м³/мин с целью предотвращения переокисления металла и шлака при глубоком «передув» ванны. Одновременно повышается расход основного кислорода на 100-120 м³/мин.

По сравнению с использованием для продувки ванны штатной 5-ти сопловой кислородной фурмы применение двухконтурной позволило достичь экономии чугуна на 8,2-14,4, извести 6,0-6,8 и плавикового шпата 0,4-1,9 кг/т стали, уменьшения степени «передува» плавки и увеличения выхода жидкой стали. Благодаря более эффективному дожиганию отходящих газов (СО₂ больше на 8-15 %) при практически равных расходах угля на плавку достигнуто повышение температуры металла на повалке на 13-27 °С при меньшей окисленности шлака и температуре заливаемого чугуна.

Проведенные опытно-промышленные кампании плавки [6-8] показали целесообразность использования в работе конвертерных цехов двухконтурных фурм и модернизированных систем подвода к ним кислорода и нейтральных газов. К сожалению, в последующие 1991-92 гг. из-за череды политических и финансовых событий, связанных с распадом СССР, исследования прекратились и предложенные разработки так и не были внедрены в постоянную промышленную эксплуатацию. Автор надеется, что в настоящее сложное в политическом и финансовом отношении для Украины время материалы статьи привлекут внимание работников подразделений металлургических комбинатов, отвечающих за внедрение в производство инноваци-

онных технических решений, и предложенные разработки по совершенствованию технологии конвертерной плавки с верхней кислородной продувкой будут востребованы.

Выводы

На основе результатов высокотемпературного моделирования и опытно-промышленных кампаний плавки на 160-т и 250-т конвертерах предложена методика определения основных конструктивных параметров многосопловых головок для двухконтурных кислородных фурм. Выданы технологические рекомендации по дутьевому и шлаковому режимам конвертерной плавки в условиях верхней продувки ванны независимо регулируемые потоками основного и дополнительного кислорода с заменой последнего на нейтральный газ в нужные периоды операции.

Библиографический список

1. Чернятевич А. Г. Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 1 // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* – 2015. – № 4.
2. Чернятевич А. Г. Современное состояние и направления совершенствования конструкций дутьевых устройств для кислородно-конвертерных процессов // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* – 2002. – № 7. – С. 20-23.
3. Чернятевич А. Г., Сигарев Е. Н., Чернятевич И. В. Новые разработки конструкций кис-

лородных фурм и способов продувки ванны 160-т конвертеров ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» // *Теория и практика металлургии.* – 2010. – № 1-2. – С. 31-38.

4. Чернятевич А. Г., Протопопов Е. В. Разработка наконечников двухконтурных фурм для кислородных конвертеров // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 1995. – № 12. – С. 13-17.

5. Баптизманский В. И., Охотский В. Б. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса. – Киев-Донецк: Вища школа, 1981. – 183 с.

6. Комбинированная продувка металла с подачей нейтрального газа сверху и через днище конвертера / А. Г. Чернятевич, Р. С. Айзатулов, Л. М. Учитель и др. // *Сталь.* – 1989. – № 5. – С. 20-23.

7. Разработка и совершенствование дутьевого режима плавки при переделе низкоуглеродистого чугуна в 250-т конвертерах / А. Г. Чернятевич, К. Г. Носов, Ю. Н. Борисов и др. // *Бюллетень НТИ «Черная металлургия».* – 1987. – Вып. 2. – С. 47-49.

8. Этапы разработок и направления совершенствования конструкций кислородных фурм в конвертерном цехе Днепровского металлургического комбината / А. Г. Чернятевич, Л. М. Учитель, В. В. Несвет и др. // *Металл и литье Украины.* – 1996. – № 9-10. – С. 42-47.

Поступила 16.07.2015

