

А.Г.Чернятевич, В.В.Вакульчук

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕРХНЕЙ ПРОДУВКИ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины

Целью настоящего исследования являлась выработка направлений дальнейшего повышения ресурсо- и энергосберегающей эффективности верхней продувки конвертерной ванны. С использованием высокотемпературного моделирования исследованы особенности верхней продувки конвертерной ванны разноимпульсными кислородными струями. Приведены методика проектирования и конструкции головок двухконтурных кислородных фурм, рекомендации по дутьевому и шлаковому режимам ведения конвертерных плавов.

Ключевые слова: конвертерная ванна, режим верхней продувки, высокотемпературное моделирование, двухконтурная кислородная фурма

Обоснование направления исследований. Многолетняя эксплуатация конвертеров с верхней кислородной продувкой убедительно показала их достоинства [1]: высокую производительность и гибкость к составу перерабатываемых чугунов; простоту конструкции оборудования и обслуживания по сравнению с современными конвертерами комбинированного дутья, особенно с подачей кислорода сверху и через днище агрегата [2]; высокую стойкость футеровки (до 10-23 тыс. плавов [3]) при использовании *гарнисажных* технологий.

Известны [1], вместе с тем, и такие существенные недостатки: слабое перемешивание металлической ванны струями кислорода и пузырями СО, особенно в нижней ее части, что обуславливает неполноту и пониженную скорость реакций между металлом и шлаком; неравномерность химического состава ванны и ее температуры; чрезмерная окисленность металла и шлака при выплавке низкоуглеродистых сталей; затруднения в управлении процессом, особенно в части подавления чрезмерного вспенивания шлака и образования выбросов; ограниченная доля перерабатываемого металлолома.

При выбранной металлошихтовке конвертерной плавки на дальнейший ход последней при верхней кислородной продувке основное влияние оказывают известные управляющие воздействия [4]:

- конструкция применяемой головки кислородной фурмы;
- расход кислорода (Q_{O_2} , м³/мин), начальная ($H_{\text{ф}}^{\text{нач}}$, м) и рабочая ($H_{\text{ф}}^{\text{раб}}$, 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, магнизиальных модификаторов и др.).

Даже в тех конвертерных цехах, где соблюдаются 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 размеры рабочего пространства агрегата, качество заваленного 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 Лаваля 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 серопогложительной 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 плавки, 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 железоуглеродистого ($\leq 0,08\%$ 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 ($H_{ф}^{раб}$, 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 является оснащение конвертеров двухконтурными фурмами [5] и системами подвода к ним двух регулируемых потоков основного и дополнительного кислорода с возможностью полной замены их на нейтральный газ (рис.1).

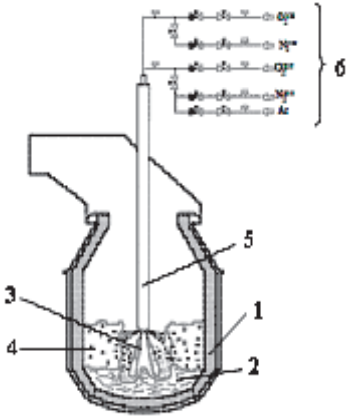


Рис.1. Схема реализации верхней продувки конвертерной ванны с использованием двухконтурной фурмы и модернизированной системы подвода к ней технологических газов:

- 1 - конвертер;
- 2 - металлическая ванна;
- 3 - реакционная зона взаимодействия кислородных струй с конвертерной ванной;
- 4 - вспененная шлакометаллическая эмульсия;
- 5 - двухконтурная кислородная фурма;
- 6 - система подвода технологических газов к двухконтурной фурме.

Это позволит:

- обеспечить возможность регулирования в ходе операции расхода основного кислорода ($Q_{O_2}^{осн}$, 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 ($Q_{O_2}^{доп}$, 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 заметалливания 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 $\leq H_{ф,раб}$ «жесткую» кислородную и «мягкую» продувку нейтральным газом, направленную на снижение окисленности металла и шлака при глубоком «передуве» ($\leq 0,08$ % C) ванны в случае выплавки низкоуглеродистых марок стали;

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

Если учесть, что технологические возможности классического конвертерного процесса с верхней кислородной продувкой полностью не исчерпаны [1], то для решения отмеченных проблем в настоящее время актуально проведение в новых направлениях теоретических и экспериментальных исследований механизма явлений, сопровождающих многоструйную верхнюю продувку конвертерной ванны разноимпульсными кислородными и нейтральными газовыми струями. Полученная при этом информация необходима для разработки и практической реализации новой ресурсо- и энергосберегающей технологии верхней продувки конвертерной ванны разноимпульсными струями кислорода и нейтрального газа, альтернативной комбинированной, чтобы при использовании более простого по конструкции глухонного конвертера, новых верхних фурм и модернизированных систем подвода к ним технологических газов обеспечить сопоставимые с комбинированной продувкой технологические и технико-экономические показатели.

Цель исследования. С учетом планируемой промышленной реализации предложенного способа продувки конвертерной ванны (рис.1) целью настоящего исследования являлось:

- приобретение с помощью высокотемпературного моделирования недостающей информации об гидрогазодинамической обстановке в полости конвертера при продувке ванны через двухконтурные фурмы разноимпульсными кислородными струями при разном уровне вспененной шлакометаллической эмульсии;

- обоснование на основе данных высокотемпературного моделирования методики проектирования и конструктивных решений головок двухконтурных фурм, дутьевого и шлакового режимов плавки с их использованием;

- выработка направлений дальнейшего повышения ресурсо- и энергосберегающей эффективности верхней продувки конвертерной ванны.

Установка и методика проведения исследований.

Высокотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны решали с применением установки (рис.2,а), смонтированной на базе 150-кг индукционной печи.

Рис.2. Внешний вид установки (а) и конструкция (б) двухконтурной кислородной фурмы с различными головками (№№ 8, 12, 14, 15, табл.1): 1- индуктор; 2 - отъемная горловина; 3 - передвижная крышка; 4 - двухконтурная кислородная фурма; 5 - медная головка; 6, 7 - основные и дополнительные сопла; 8, 9, 10 и 11 - трубы подачи основного кислорода, разделительная, кислорода дожигания и наружная; 12 - крепежная планка; 13,14, 15 и 16 - патрубки подвода и отвода воды, подвода основного и дополнительного кислорода

Порядок проведения экспериментов был следующим. 120 кг перedefельного чугуна известного состава (в среднем 4,15%С, 0,32%Mn, 0,55%Si, 0,034%S и 0,060%P) расплавляли, а затем нагревали до 1300-1450⁰С в магнетитовом тигле индукционной печи. После отбора пробы чугуна устанавливали требуемую рабочую высоту расположения двухконтурной фурмы (рис.2, б) над поверхностью расплава и начинали продувку с общим расходом кислорода (Q_{O_2}) 2,2-2,8 м³/(т.мин). Для наведения шлака после «зажигания» плавки рассредоточено присаживали доломитизированную известь и плавиковый шпат в количестве 1,5-2,5 кг и 0,2-0,3 кг соответственно.

Наблюдение за ходом продувки с фиксацией видеокамерой процессов взаимодействия кислородных струй с конвертерной ванной осуществлялось через смотровое окно (рис.2,а). На протяжении всего периода продувки с интервалом 3-5 мин отбирали пробы металла и шлака для последующего химического анализа. На ряде плавков для оценки степени дожигания отходящих газов в рабочем пространстве конвертера отбирали пробы конвертерного газа, которые анализировали на содержание CO, CO₂, N₂, O₂.

Головки применяемых двухконтурных фурм с круговым двухрядным расположением цилиндрических сопел (табл.1) отличались количеством основных (n_b) и дополнительных (n_n) сопел в контурах, их диаметрами (d_b , d_n) и углами наклона к вертикальной (α_b , α_n) оси фурмы, а также диаметрами окружности расположения осей выходных сечений сопел (D_b , D_n) на торце головки.

Таблица 1. Конструктивные параметры головок лабораторных двухконтурных фурм

Номер головки	Ряд основных сопел				Ряд дополнительных сопел			
	n_b , шт.	d_b , мм	α_b , град	D_b , мм	n_n , шт.	d_n , мм	α_n , град.	D_n , 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

Изложение основных результатов исследования. В ходе экспериментов при расходе кислорода 70-90% от общего через группу основных сопел (3 или 4 сопла) внутреннего контура головок (табл.1) стремились организовать разделение или объединение выходящих из реакционных зон воздействия кислородных струй на ванну потоков CO, а встречно направленными дополнительными струями, формируемыми 6-ю – 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.

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. При этом фиксируется дожигание выделяющегося CO, дробление и сжигание попадающих в дополнительные кислородные струи капель металла (рис.3).

Рис.3. Картина продувки конвертерной ванны 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 расположении головки двухконтурной фурмы № 14 на высоте 60 калибров: 1 - двухконтурная фурма; 2 - поверхность шлака; 3 - брызги металла и шлака; 4 - дожигание CO и сжигание капель металла в струях

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 незначительном перекрытии вспененным шлаком среза головки 9-ти сопловой фурмы наблюдался прерывистый выход макрообъемов CO на поверхность ванны в виде крупных пузырей (рис.4), превышающих размеры отдельной реакционной зоны. Раскрытие макропузыря на поверхности ванны на окончательной стадии сопровождалось интенсивным выделением бурого дыма (рис.5).

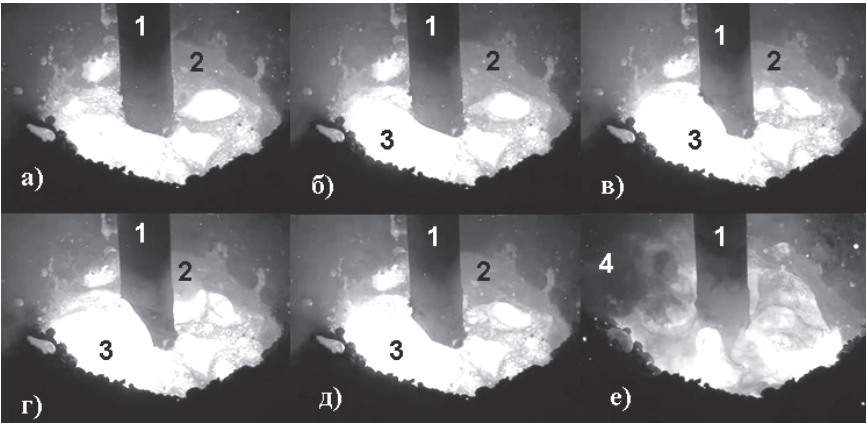


Рис.4. Картина выхода макропузыря CO на поверхность шлака: 1- двухконтурная фурма № 8; 2 - поверхность шлака; 3- разрушение макропузыря CO на поверхности ванны; 4- выход бурого дыма

С применением 11-ти сопловой (№ 12) двухконтурной фурмы удавалось создавать, 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 CO₂ в «свищевом» потоке отходящих газов.

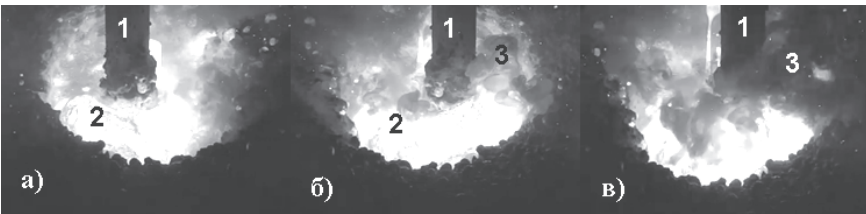


Рис.5. Картина выхода бурого дыма из реакционной зоны: 1 - двухконтурная фурма; 2 - разрушение макропузыря CO на поверхности ванны; 3- выход бурого дыма

В том случае, когда головка двухконтурной 12-ти сопловой фурмы (№ 14) погружена на значительную глубину во вспененную шлакометаллическую эмульсию, то на поверхности ванны в местах выхода CO образуются всплески шлакометаллической взвеси (рис.6). При этом интенсивность выделения бурого дыма значительно снижается, что объясняется фильтрующим воздействием шлаковой фазы.

Если в начальный период продувки при расположении торца головки двухконтурной фурмы над слоем вспененного шлака небольшой высоты отчетливо фиксируется дожигание выходящего из пределов реакционной потока CO струями дополнительного кислорода (рис.3) с образованием факела дожигания, непосредственно направленного на поверхность конвертерной ванны, то при погружении головки на значительную глубину во вспененную шлакометаллическую эмульсию на протяжении большей части длительности плавки условия дожигания отходящего потока CO ухудшаются. В данном случае дожигание выходящего из реакционной зоны потока CO во всплывающих макропузырях (рис.4-6) несколько затруднено, так как отсутствует «свищевой» характер выхода газа из-за наличия прослоек шлакометаллической фазы между макропузырями. При формировании с помощью дополнительных кислородных струй обширной низкоскоростной завесы над зоной всплывания макропузырей CO должно способствовать повышению эффективности дожигания CO до CO_2 .

Как и следовало ожидать, проведенная при сопоставимых условиях продувки конвертерной ванны оценка показателя (табл.2) дожигания отходящих газов (CO_2) при использовании различных фурм показала предпочтительность применения головок с двухрядным расположением сопел при регулируемом двухконтурном подводе кислорода. При этом использование двухконтурных фурм (№ 8, 12, табл.2), обеспечивающих формирование объединенной реакционной зоны интенсивного выхода CO на поверхность ванны (рис.7, б), является предпочтительным.

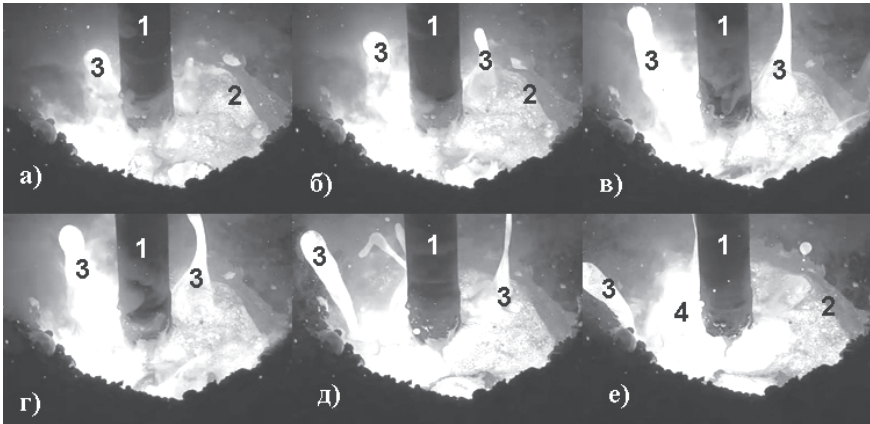


Рис.6. Картина образования всплесков шлакометаллической взвеси над поверхностью ванны: 1- двухконтурная фурма № 14; 2 - поверхность шлака; 3- всплески шлакометаллической взвеси; 4 - выход CO

Таблица 2. Усредненные показатели $\text{CO}_2^{\text{г}}$ дожигания отходящего газа при продувке конвертерной ванны ($N_{\text{ф}}^{\text{раб}}=35$ 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, %	$\text{CO}_2^{\text{г}} = 100 \text{CO}_2 / (\text{CO} + \text{CO}_2)$, %			
	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

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

В результате проведенного высокотемпературного моделирования с учетом предыдущих разработок [6] была обоснована следующая методика 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 ($Q_{\text{O}_2^{\text{в}}}$, $\text{м}^3/\text{мин}$) и наружной ($Q_{\text{O}_2^{\text{н}}}$, $\text{м}^3/\text{мин}$) группами сопел Лаваля и цилиндрических соответственно, а также целесообразной формой организации реакционной зоны.

При реализации варианта по схеме (рис.7,а) создания внутренней группой сверхзвуковых кислородных струй обособленных реакционных зон интенсивного выделения монооксида углерода на поверхность ванны с дожиганием последнего дозвуковыми струями, формирующимися цилиндрическими соплами наружного контура, максимальное число сопел Лаваля во внутреннем контуре головки ($n_{\text{в}}^{\text{макс}}$) определяется по известной формуле [7]

$$n_{\text{в}}^{\text{макс}} = (Q_{\text{O}_2} - Q_{\text{O}_2^{\text{н}}}) / (H^1 / 0,85)^{2,74}, \quad (1)$$

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 ($n_{\text{в}}^{\text{макс}}$) следует уменьшить, как показали материалы производственных испытаний, на одно (в диапазоне расхода кислорода $Q_{\text{O}_2^{\text{н}}} = 300-500 \text{ м}^3/\text{мин}$) или на два (при $Q_{\text{O}_2^{\text{н}}} = 700-1100 \text{ м}^3/\text{мин}$), 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.

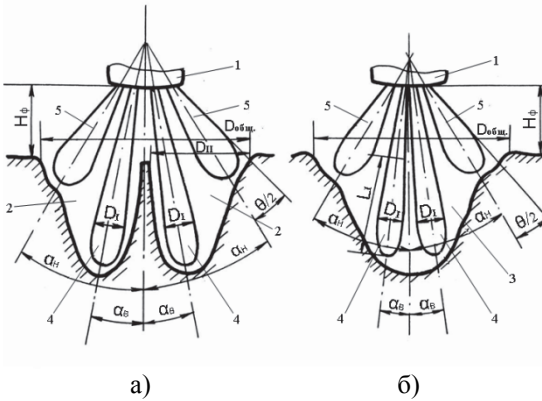


Рис.7. Схема реакционной зоны при продувке ванны двухконтурными фурмами:
1- головка фурмы;
2 и 3- обособленные и общая реакционные зоны выделения монооксида углерода;
4 и 5- сверхзвуковые и дозвуковые кислородные струи.

Разведение реакционных зон интенсивного выхода монооксида углерода на поверхность ванны достигается [4] путем предотвращения слияния в глубине расплава струйных участков первичных реакционных зон максимального диаметра ($D_{I \max}$), что обеспечивается при выполнении соотношения

$$\tan \frac{\theta_k}{2} = \frac{D_{I \max} - a}{2(H_{\phi}^{раб} + L)} \quad (2)$$

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

Значения рабочей высоты фурмы над уровнем ванны $H_{\phi}^{раб}$, минимальной длины $L_{I \min}$ и максимального диаметра $D_{I \max}$ первичной реакционной зоны при выбранном расходе кислорода $Q_{O_2}^{осн}$ определяются из выражений

$$H_{\phi}^{раб} / d_{вых} = 37,2 (\sum i_{O_2}^{осн} / mg)^{0,092}; \quad (3)$$

$$L_{I \min} (H_{\phi} + L_{I \min})^2 = 75,1 \frac{i_{O_2}^{осн}}{\rho_{кс} g \cos \alpha} \quad (4)$$

$$D_{I \max} = 3,09 \sqrt{\frac{i_{O_2}^{осн}}{\rho_{кс} g L_{I \min}}}, \quad (5)$$

в которых $d_{вых}$ - выходной диаметр сопла Лавалья, м; $i_{O_2}^{осн}$ и $\sum i_{O_2}^{осн}$ - импульсы одиночный и суммарный основных кислородных струй, Н; m -

масса жидкого металла, кг; g - ускорение силы тяжести, м/с²; $\rho_{ж}$ - плотность металла, кг/м³.

При найденном значении φ_2 величина α_2 определяется из соотношения

$$\sin \alpha_2 = \frac{\sin(\varphi_2/2)}{\sin(180^\circ/\alpha_2)} . \quad (6)$$

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.7,б), необходимые значения углов φ_2 и α_2 находятся из вышеприведенных выражений (2-6) с учетом соприкосновения в глубине расплава струйных участков первичных реакционных зон с минимальным диаметром $D_{\text{Тmin}}$, определяемым из уравнений

$$D_{\text{Тmin}} = 2,68 \sqrt{\frac{V_{\text{CO}_2}^{\text{общ}}}{\rho_{ж} g L_{\text{Тmax}}}} ; \quad (7)$$

$$L_{\text{Тmax}} (H_{\text{Ф}} + L_{\text{Тmax}})^2 = 133,3 \frac{V_{\text{CO}_2}^{\text{общ}}}{\rho_{ж} g \cos \alpha} . \quad (8)$$

Рациональное количество цилиндрических сопел в наружном контуре головки, их размеры, углы наклона в плане (φ_n) и к вертикальной оси фурмы (α_n) 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 [6] дозвуковые кислородные потоки с расширением в них областей со скоростью 5-12 м/с, сопоставимой со скоростью перемещения фронта пламени в смеси СО-О₂. С другой стороны, необходимо обеспечить возможность некоторого внедрения факелов дожигания СО до СО₂ в пределах диаметра общей реакционной зоны ($D_{\text{Общ}}^1$) 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 СО до СО₂ по схеме рис.7,б. В этом случае угол α_n наклона к вертикали равномерно расположены по кругу цилиндрических сопел наружного контура определяется из выражения

$$\tan \alpha_n = \frac{D_{\text{осн}}}{2H_{\text{осн}}} - \tan \frac{\theta_{\text{осн}}}{2}, \quad (9)$$

где $\theta_{\text{осн}}$ - угол раскрытия дозвуковой кислородной струи, град.

В свою очередь

$$D_{\text{осн}}^2 = 11,3 H_{\text{осн}}^2 \left[\frac{v_{\text{осн}}^2}{\rho_{\text{ж}} (H_{\text{осн}}^2)^2} \right]^{0,65} (1 + L_{\text{II min}} \operatorname{tg} \alpha_n) + d_0 + 2 (H_{\text{осн}}^2 + L_{\text{II min}}) \operatorname{tg} \alpha_n; \quad (10)$$

$$L_{\text{II min}} (H_{\text{осн}} + L_{\text{II min}})^2 = 205,3 \frac{v_{\text{осн}}^2}{\rho_{\text{ж}} g \cos \alpha_n}; \quad (11)$$

$$\tan \frac{\theta_{\text{осн}}}{2} = 0,234 \bar{\rho}^{0,144}. \quad (12)$$

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

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

$$n_n \leq \frac{180}{\arcsin \frac{D_{\text{II max}} \cos \alpha_n - 2 (H_{\text{осн}}^2 + L_{\text{II min}}) \tan(\alpha_n/2)}{d_n \cos \alpha_n}}, \quad (13)$$

в которой d_n - 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.7,а) 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 СО на поверхность ванны ($D_{\text{II max}}$) определяется на основе уравнений

$$D_{\text{II max}} = 5,81 \sqrt{\frac{v_{\text{осн}}^2}{\rho_{\text{ж}} g L_{\text{II max}}}}; \quad (14)$$

$$L_{\text{II max}} (H_{\text{осн}} + L_{\text{II max}})^2 = 228,6 \frac{v_{\text{осн}}^2}{\rho_{\text{ж}} g \cos \alpha}. \quad (15)$$

В свое время (на протяжении 1983-90 гг.), были созданы и проверены в широком опытно-промышленном масштабе новые конструкции двухконтурных фурм с многосопловыми головками (рис.5), обеспечивающими продувку ванны 160-т и 250-т конвертеров Западно-Сибирского [6,8] и Днепропетровского [9,10] металлургических комбинатов соответственно.

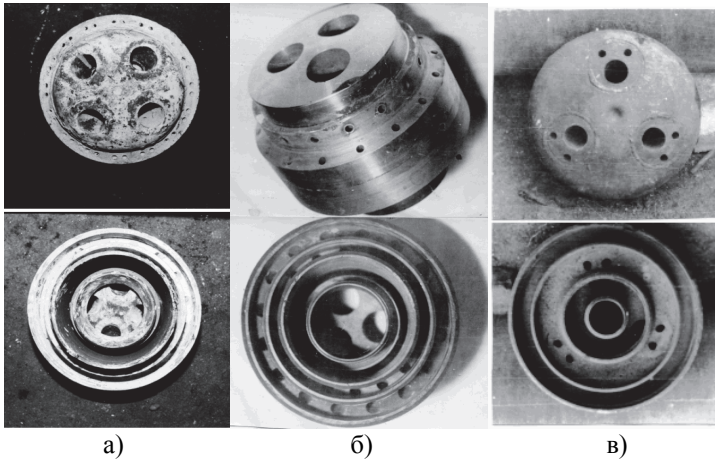


Рис.8. Внешний вид 36-ти (а), 35-ти (б) и 9-ти (в) сопловых головок двухконтурных фурм

Если учесть сегодняшние условия работы конвертерных цехов Украины, то из опробованных ранее конструкций двухконтурных фурм [6,8-10] предпочтение для дальнейшего совершенствования и внедрения в 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.8,а), 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 α_n 12 или 15 град с целью обеспечения объединенного (рис.7,б) или отдельных (рис.7,а) потоков выделения монооксида углерода из реакционной зоны. Внешний контур выполняется в составе 32-х цилиндрических сопел под углом $\alpha_n = 30-35$ град, 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 брызговыносом объемов металла и шлака.

При выбранном конструктивном решении головки (рис. 8, а) можно по-разному компоновать сопла внутреннего и внешнего контуров относительно друг друга и в широких пределах изменять число дополнительных сопел и угол (α_n) их наклона. Определенные ограничения на количество дополнительных цилиндрических сопел накладывают размеры головки, определяемые диаметром наружной трубы, и площадь межсопловое пространство для прохода необходимого количества охлаждающей воды. Во всяком случае, даже при наружном диаметре

трубы 219 мм, удается без осложнений в 35-ти сопловой головке (рис.8,б) 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 CO до CO₂;

- двухконтурной фурме с диаметром наружной трубы 426 мм и центральным подводом охлаждающей воды с расходом 350-400 м³/час к 9-ти (рис.8,в) или 12-ти сопловой головке, приспособленной для продувки ванны 250-350т конвертеров с расходом основного и дополнительного кислорода в пределах 900-1200 и 50-250 м³/мин. В случае 9-ти сопловой головки (рис.8,в) три сопловых блока размещены в ней с образованием внутреннего контура 3-х сопел Лавалья, расположенных под углом $\alpha_E = 15$ град к вертикали, и наружного контура в составе 6-ти цилиндрических сопел с углом $\alpha_n = 23$ град.

Отработанный на 160-т конвертерах ЗСМК режим продувки и присадки сыпучих материалов с использованием двухконтурной фурмы с 36-ти сопловой головкой (рис.8,а) 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 корректируется относительно расчетных значений, определенных с использованием полученных выражений (16) и (3)

$$H_{\text{ф}}^{\text{раб}}/d_{\text{фнк}} = 63,1(\sum i_{\text{O}_2}^{\text{сн}}/m_{\text{г}})^{0,094} \quad (16)$$

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 минут 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.8,а) по сравнению с обычной 5-ти сопловой обеспечил повышение показателя дожигания отходящих газов CO_2 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 заметалливание 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.8,в) 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 минут 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» плавок и увеличения выхода жидкой стали. Благодаря более эффективному дожиганию отходящих газов (CO_2 больше на 8-15 %) при практически равных расходах угля на плавку достигнуто повышение температуры металла на повалке на 13-27⁰С при меньшей окисленности шлака и температуре заливаемого чугуна.

Проведенные опытно-промышленные кампании плавки [8-10] 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 годы 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. Авторы надеются, 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 инновационных 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.

1. *Арсентьев П.П.* Производство стали в конвертерах // Итоги науки и техники. Сер. Производство чугуна и стали /ВИНИТИ. – 1983. – Т.14. – 69-149.
2. *Смоктый В.В., Лапицкий В.В., Белокуров Э.С.* Комбинированные процессы выплавки стали в конвертерах. – К.: Техніка, 1992. – 163 с.
3. *Чернятевич А.Г.* Новые технологии и фурменные устройства для нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. науч. трудов ИЧМ. – 2014. – Вып. 29. – С. 139-152.
4. *Чернятевич А.Г.* Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 1 // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 4. – С.2-31.
5. *Чернятевич А.Г.* Современное состояние и направления совершенствования конструкций дутьевых устройств для кислородно-конвертерных процессов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – №7. – С.20-23.
6. *Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В.* Разработка наконечников двухконтурных фурм для кислородных конвертеров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1995. – № 12. – С. 13-17.
7. *Баттизманский В.И., Охотский В.Б.* Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса. – Киев-Донецк: Вища школа, 1981. – 183 с.

8. *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.
9. *Разработка* и совершенствование дутьевого режима плавки при переделе низкомарганцовистого 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.
10. *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.

*Статья рекомендована к печати
докт. техн. наук А. С. Вергуном*

А.Г.Чернятевич, В.В.Вакульчук

Про підвищення ефективності верхньої продувки конвертерної ванни

Метою дослідження було вироблення напрямів подальшого підвищення ресурсо- та енергозберігаючої ефективності верхньої продувки конвертерної ванни. З використанням високотемпературного моделювання досліджено особливості верхньої продувки конвертерної ванни різноімпульсними кисневими струменями через двоконтурні фурми. Представлено методику проектування та конструкції головок двоконтурних кисневих фурм, надано рекомендації щодо дутьових і шлакових режимів ведення конвертерних плавок з метою покращення техніко-економічних показників киснево-конвертерного процесу.

Ключові слова: конвертерна ванна, режим верхньої продувки, високотемпературне моделювання, двоконтурна киснева фурма

A.G.Cherniatevich, V.V.Vakulchuk

Improving the efficiency of converter bath top-blowing

The aim of this study was to develop directions to further enhance the efficiency of resource and energy saving bath top converter blowing. With the use of high-temperature modelling the peculiarities of top-blowing of oxygen converter bath by oxygen jets of different impulses with the use of double-lances are studied. The design

method and technical solutions of double-oxygen lance tip design are given, the recommendations for their use during converter melting as well as the blowing and slag regimes are suggested, the implementation of recommended items provide technical and economic indicators improvement of the BOF process.

Keywords: BOF bath, upper purge mode, high temperature simulation, dual oxygen lance