

А.Г.Чернятевич¹, Л.С.Молчанов¹, П.О.Юшкевич¹, М.К.Чубин²

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОДУВКИ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХЪЯРУСНОЙ КИСЛОРОДНОЙ ФУРМЫ

¹*Институт черной металлургии НАН Украины*
²*Днепропетровский государственный технический университет**

Выполнено термодинамическое обоснование возможности эффективного дожигания отходящих газов в различных реакционных зонах рабочего пространства конвертера. Путем термодинамического и высокотемпературного моделирования показано, что использование верхней трехъярусной кислородной фурмы при комбинированной продувке конвертерной ванны обеспечивает повышение эффективности дожигания СО до СО₂ в полости конвертера с предотвращением локального износа футеровки, интенсивного заметалливания фурмы и горловины агрегата.

Ключевые слова: термодинамическое и высокотемпературное моделирование, продувка конвертерной ванны, трехъярусная кислородная фурма.

Состояние вопроса. Применение наиболее распространенной в мировой сталеплавильной практике технологии комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом сверху и нейтральным перемешивающим газом через днище агрегата позволило [1] существенно изменить характер и ход окисления примесей, что выразилось в улучшении технико-экономических показателей плавки. Благодаря улучшению перемешивания ванны, ускорению тепломассообменных процессов между газовой, шлаковой и металлической фазами реакции рафинирования в большей степени приблизились к равновесию. Это позволило при меньшей окисленности шлака улучшить шлакообразование и процессы удаления вредных примесей (фосфора и серы), получить по завершении продувки более высокие концентрации марганца в сравнении с обычным кислородно-конвертерным процессом. Вместе с тем не решены такие негативные проблемы комбинированной продувки [2] как интенсивное заметалливание технологического оборудования (ствола кислородной фурмы, горловины конвертера и экранных поверхностей камина).

Обоснование направления исследований. В свое время улучшение теплового баланса конвертерной плавки и снижение интенсивности заметалливания технологического оборудования обеспечивалось при комбинированной продувке [1,3] с использованием двухъярусных кислородных фурм. При этом за счет дополнительного прихода тепла в результате частичного дожигания СО до СО₂ в рабочем пространстве конвертера, с одной стороны, обеспечивалось увеличение доли перерабатываемого металлолома и предотвращение интенсивного заметалливания ствола фурмы

и горловины агрегата, а с другой – негативно отражалось на стойкости футеровки конвертера [1,3].

Для выхода из создавшегося положения с учетом результатов промышленных плавов [3] предложено оснастить конвертерные агрегаты новыми конструкциями трехъярусных фурм [2] и системами подвода к ним двух регулируемых потоков кислорода с возможностью их полной замены на азот в нужные периоды операции. Это позволит, по мнению авторов, обеспечить продувку конвертерной ванны в режиме глубокого проникновения в металлический расплав основных сверхзвуковых кислородных струй, истекающих из сопел Лавала нижнего двухрядного наконечника. Одновременно дополнительными звуковыми кислородными струями, формируемыми цилиндрическими соплами, расположенными в наконечнике и в верхнем сопловом блоке, создается обширная низкоскоростная область кислородных потоков на пути встречного потока монооксида углерода, преимущественно выходящего из реакционной зоны взаимодействия основных кислородных струй с расплавом. Эта область, в зависимости от высоты фурмы над ванной и расхода дополнительного кислорода, определяет режимы шлакообразования, подавления интенсивного выноса мелких капель металла и шлака в направлении ствола фурмы и горловины конвертера, дожигания отходящих газов без агрессивного воздействия на футеровку верхней части конвертера.

Цель исследования. С учетом планируемой промышленной реализации предложенного способа комбинированной продувки конвертерной ванны [2] с использованием трехъярусной кислородной фурмы целью настоящего исследования являлось:

- термодинамическое обоснование возможности более эффективного дожигания отходящих газов в различных реакционных зонах рабочего пространства конвертера;

- установление с использованием высокотемпературного моделирования физико-химических явлений в полости конвертера при разных режимах продувки конвертерной ванны кислородом с использованием трехъярусной фурмы.

Установка и методика высокотемпературного моделирования. Исследования проводили на смонтированной с учетом приобретенного опыта [4] установке, включающей 60-кг конвертер (рис.1), снабженный съемной горловиной с окном для фиксации хода продувки видеокамерой со скоростью 300 кадров/с.

Футеровка конвертера выполнена путем набивки по шаблонам из обожженного магнезитового порошка со связкой на жидком стекле. Уменьшение теплопотерь достигается применением слоя каолиновой ваты и листового асбеста, уложенных между кожухом и футеровкой конвертера.

Обжиг и разогрев футеровки конвертера перед плавкой осуществляется путем сжигания загруженного в конвертер кокса с вдуванием в объем последнего компрессорного воздуха. Отвод образующихся дымовых газов в

ходе разогрева футеровки, так и продувки конвертерной ванны производится через металлошланговый рукав, соединенный с дымососом.

Для верхней продувки конвертерной ванны использована трехъярусная водоохлаждаемая кислородная фурма (рис.1, б), снабженная нижним двухрядным 12-ти сопловым наконечником, включающим 4 сопла Лавала критического диаметра 1,7 мм, расположенных во внутреннем ряду под углом (α_1) 12° к вертикальной оси фурмы, и 8 цилиндрических сопел диаметром 1 мм, находящихся в наружном ряду под углом (α_2) 30°. На удалении 105 мм от торца наконечника расположен верхний сопловый блок, включающий 8 цилиндрических сопел диаметром 1мм под наклоном (α_3) 30° к вертикали.

Двухрядный наконечник спроектирован с расчетом [5], чтобы с помощью четырех основных сверхзвуковых кислородных струй, подаваемых через сопла Лавала внутреннего ряда, сформировать общую реакционную зону (открытой формы) интенсивного выделения СО на поверхность ванны при разном уровне вспененного шлака, а дополнительными звуковыми кислородными струями из восьми цилиндрических сопел наружного ряда дожигать СО до СО₂ в непосредственной близости к металлическому расплаву. Кроме того, на пути дальнейшего движения потока СО к горловине конвертера, в том числе через вспененный слой шлакометаллической эмульсии, обеспечить дополнительное дожигание последнего звуковыми кислородными струями, истекающими из 8 цилиндрических сопел верхнего соплового блока.

В ходе экспериментов независимо регулируемый расход основного и дополнительного кислорода изменялся в пределах 0,12-0,25 и 0,084-0,132 м³/мин соответственно через группы сопел Лавала и цилиндрических. Высоту фурмы над уровнем ванны в спокойном состоянии изменяли в пределах 20-50 критических диаметров сопла Лавала.

Жидкий низкомарганцовистый чугун, имеющий химический состав 4,05-4,50 % С, 0,49-0,90 % Si, 0,03-0,15 % Mn, 0,022-0,050 % S и 0,048-0,058 % P и температуру 1600-1650 °С, готовили в кислом тигле 160-кг индукционной печи с учетом теплопотерь за время заливки чугуна в конвертер и подготовительных работ (установка горловины, отбор пробы и замер температуры чугуна, замер глубины ванны, фиксация трехъярусной фурмы на заданной высоте) перед началом продувки.

Порядок продувки чугуна кислородом через трехъярусную фурму с вводом кусковых (фракция 10-12 мм) извести и плавикового шпата в ходе операции изменяли по заранее составленной программе. В ходе продувки производился отбор проб металла и шлака. После падения факела над горловиной конвертера ($[C] \leq 0,08 \%$) поднимали фурму с одновременным прекращением подачи кислорода. В отработанном варианте дутьевого и шлакового режимов ведения плавки температура расплава возрастала в ходе продувки с первоначальных 1300-1340 до 1610-1630 °С по окончании операции.

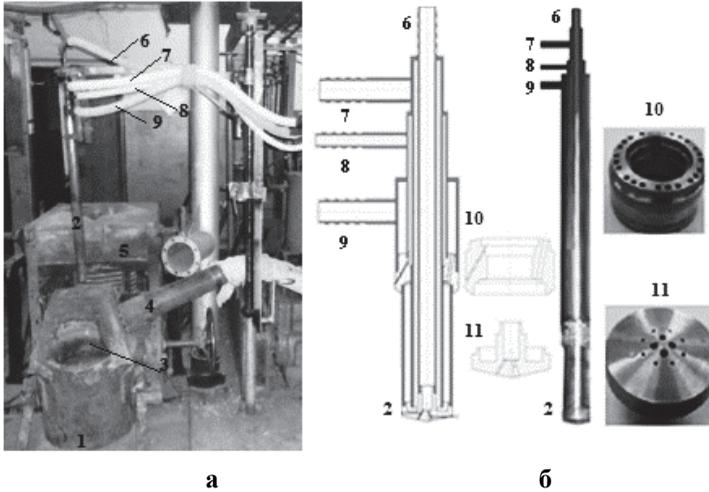


Рисунок 1 – Вид лабораторного конвертера (а) и трехъярусной кислородной фурмы (б): 1-конвертер; 2- фурма; 3-смотровое окно; 4-металлошланговый рукав для отвода конвертерных газов; 5-тигель 160-кг индукционной печи; 6,8-патрубки подвода основного и дополнительного кислорода соответственно; 7,9-патрубки подвода и отвода охлаждающей воды соответственно; 10- верхний сопловой блок; 11- нижний двухрядный наконечник.

Изложение основных результатов исследования. Если ставить задачу повышения эффективности комбинированной продувки с условием предотвращения агрессивного воздействия высокотемпературных факелов дожигания CO до CO_2 на футеровку конвертера и снижения интенсивности заматалливания ствола фурмы и горловины агрегата, то наиболее перспективным направлением решения данного вопроса является организация дожигания отходящих газов в пределах специально создаваемых реакционных зон воздействия кислородного дутья на ванну и на пути движения конвертерных газов через слой вспененной шлакометаллической эмульсии.

В этом случае обобщенная схема реакций в системе $Fe-O-C$ для различных зон рабочего пространства конвертера, применительно к разрабатываемому способу комбинированной продувки кислородом сверху через трехъярусную фурму и нейтральным перемешивающим газом через днище [2], представлена на рис.2 и в таблице (индексы: с- зона струи; р.з.- реакционная зона; ш- зона вспененной шлакометаллической эмульсии; м-зона металлической ванны; к- корольки металла).

В соответствии с принятой схемой развития реакций при продувке ванны была произведена оценка показателя дожигания CO до CO_2 (CO'_2) для вышеуказанных реакционных зон рабочего пространства конвертера согласно выражению

$$CO'_2 = \frac{CO_2}{CO + CO_2} \cdot 100 = \frac{\varepsilon_c}{1 + \varepsilon_c} \cdot 100, \% \text{ объемный}, \quad (1),$$

где $\varepsilon_c = \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$ - отношение парциальных давлений CO_2 и CO .

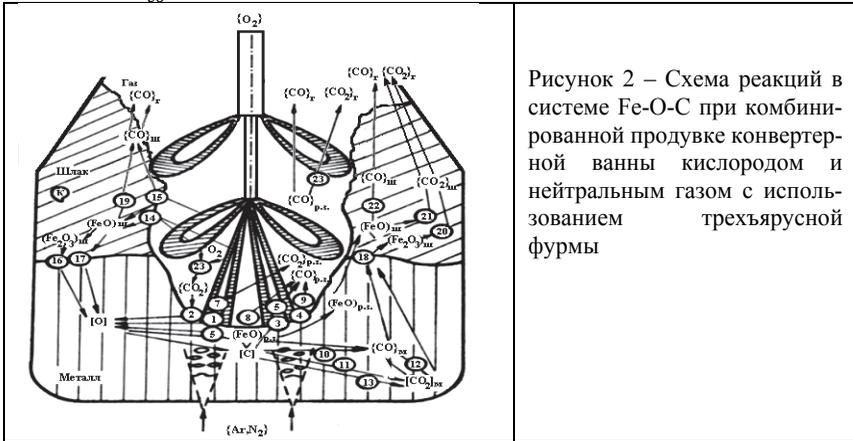


Рисунок 2 – Схема реакций в системе Fe-O-C при комбинированной продувке конвертертной ванны кислородом и нейтральным газом с использованием трехъярусной формы

Таблица. Реакции в системе Fe-O-C при комбинированной продувке конвертертной ванны в соответствии с рис. 2

№№ реак-ций	Зоны протекания реакций	Реакции
1	р.з.	$1/2 \{O_2\}_c = \{O\}$
2		$\{CO_2\}_c = \{O\} + \{CO\}_{p.z.}$
3		$[Fe] + 1/2 \{O_2\}_c = (FeO)_{p.z.}$
4		$[Fe] + \{CO_2\}_c = (FeO)_{p.z.} + \{CO\}_{p.z.}$
5		$(FeO)_{p.z.} = [Fe] + \{O\}$
6		$[C] + 1/2 \{O_2\}_c = \{CO\}_{p.z.}$
7		$[C] + \{O_2\}_c = \{CO_2\}_{p.z.}$
8		$[C] + (FeO)_{p.z.} = \{CO\}_{p.z.} + [Fe]$
9		$[C] + \{CO_2\}_c = 2\{CO\}_{p.z.}$
10	м	$[C] + \{O\} = \{CO\}_m$
11		$[C] + 2\{O\} = \{CO_2\}_m$
12		$\{CO\}_m + \{O\} = \{CO_2\}_m$
13		$[C] + \{CO_2\}_m = 2\{CO\}_m$
14	ш	$2(FeO)_{ш} + 1/2 \{O_2\}_c = (Fe_2O_3)_{ш} + \{CO\}_{ш}$
15		$2(FeO)_{ш} + \{CO_2\}_c = (Fe_2O_3)_{ш} + \{CO\}_{ш}$
16		$(Fe_2O_3)_{ш} = \{O\} + 2(FeO)_{ш}$
17		$(FeO)_{ш} = \{O\} + [Fe]$
18		$(Fe_2O_3)_{ш} + [Fe] = 3(FeO)_{ш}$
19		$[C]_{к} + (FeO)_{ш} = \{CO\}_{ш} + [Fe]$
20		$\{CO\}_{ш} + (Fe_2O_3)_{ш} = \{CO_2\}_{ш} + 2(FeO)_{ш}$
21		$\{CO\}_m + (FeO)_{ш} = \{CO_2\}_{ш} + [Fe]$
22	$\{CO_2\}_m + 2(FeO)_{ш} = \{CO\}_{ш} + (Fe_2O_3)_{ш}$	
23	с	$\{CO\}_{p.z.} + 1/2 \{O_2\}_c = \{CO_2\}_{p.z.}$

В зоне металлической ванны система в целом характеризуется возможностью четырех взаимодействий (см. табл.), но все особенности равновесия однозначно определяются основными реакциями (10) и (11), имеющими более отрицательные значения энергии Гиббса в интервале температур соответствующих процессам сталеварения.

Термодинамические расчеты с учетом данных [6,7] показывают (рис.3, а), что значительные равновесные количества CO_2 в продуктах реакций обезуглероживания металлической ванны возможно получить только при низких содержаниях углерода и высоких концентрациях кислорода в месте протекания реакции.

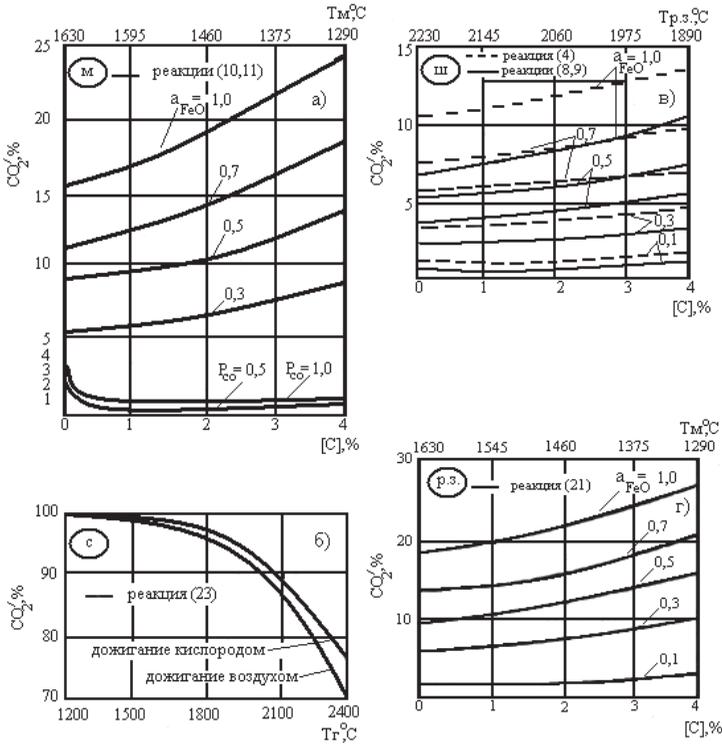


Рисунок 3. – Изменение показателя дожигания конвертерных газов (CO_2) в различных зонах рабочего пространства конвертера

В условиях равновесия содержания кислорода в металле $[\%O]_{р.л.}$ с пузырьками CO и углеродом

$$\varepsilon_c \approx (K_{11}/K_{10})[\%O]_{р.л.}, \quad (2)$$

где K_{11}/K_{10} -константы равновесия реакций (10) и (11) соответственно.

Когда локальное содержание кислорода в расплаве $[\%O]_{р.ш.}$ равновесно с оксидами железа в шлаке

$$\varepsilon_c \approx (K_{11}/K_{10})[\%O]_{\text{р.ш.}}, \quad (3)$$

$$\text{где } [\%O]_{\text{р.ш.}} = \text{FeO}[\%O]_{\text{пред.}} \quad (4)$$

Значения $[\%O]_{\text{р.ш.}}$ и $[\%O]_{\text{пред.}}$ определяли с учетом данных работ [6,7].

В последнем случае величина CO_2 достигает значительно больших значений во всем диапазоне содержаний углерода 0,03-4,0%.

Для указанного диапазона концентраций углерода изменение температуры металла (T_m) описывается зависимостью

$$T_m = 1630 - 85[\%C], \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (5)$$

отражающей условия работы конвертерных цехов с обеспечением температуры металла на выпуске из конвертера ≤ 1630 $^\circ\text{C}$.

Упомянутые условия преобладающего окисления углерода до CO_2 можно организовать в пределах реакционной зоны воздействия кислородных струй на сталеплавильную ванну, где как установлено специальными опытами, развивается преимущественное обезуглероживание [8]. В этом месте термодинамически возможно образование CO_2 по реакциям (11) и (12). Если в верхнюю часть реакционной зоны, а также на пути движения отходящих газов, дополнительно вдувать дозвуковые и звуковые кислородные струи из цилиндрических сопел наконечника и верхнего соплового блока трехъярусной фурмы (рис. 1, 2), то возрастает вероятность протекания реакции (23), особенно с понижением температуры газа (рис. 3,б).

В этом случае

$$\varepsilon_c = \frac{1 - \alpha_{\text{CO}_2}}{\alpha_{\text{CO}_2}} \quad (6)$$

$$K_{23} = (2 + \alpha_{\text{CO}_2})(1 - \alpha_{\text{CO}_2})^2 / P \cdot \alpha_{\text{CO}_2}^3, \quad (7)$$

Здесь: K_{23} -константа равновесия реакции (23); α_{CO_2} -степень диссоциации CO_2 ; P - общее давление.

При условии совершенного контакта продуктов реакций (10)-(13) и (23) с металлической фазой реакционной зоны определяющими состав отходящих газов из этого места будут реакции (4),(8) и (9).

В данном случае температура реакционной зоны ($T_{\text{р.з.}}$) определялась на основании (5) из условия [9]

$$T_{\text{р.з.}} = T_m + 600^\circ\text{C}; \quad (8)$$

$$\varepsilon_c = (K_8/K_9)a_{\text{FeO}},$$

$$\varepsilon_c = a_{\text{FeO}}/K_4, \quad (9)$$

где K_8, K_9, K_4 - константы равновесия реакций (8),(9),(4) в соответствии с табл.

Снижение конечного эффекта дожигания отходящих газов (рис.3 ,в) при тесном контакте продуктов реакций (10)-(13) и (23) с металлом реакционной зоны наблюдается несмотря на возможное увеличение коэффициента усвоения тепла при обеспечении заглубления факела дожигания во вспененную шлакометаллическую эмульсию.

В зоне вспененной шлакометаллической эмульсии, определяющей равновесный состав отходящих газов, является реакция (21)

$$\varepsilon_c = K_{21} \cdot a_{\text{FeO}} \quad (10),$$

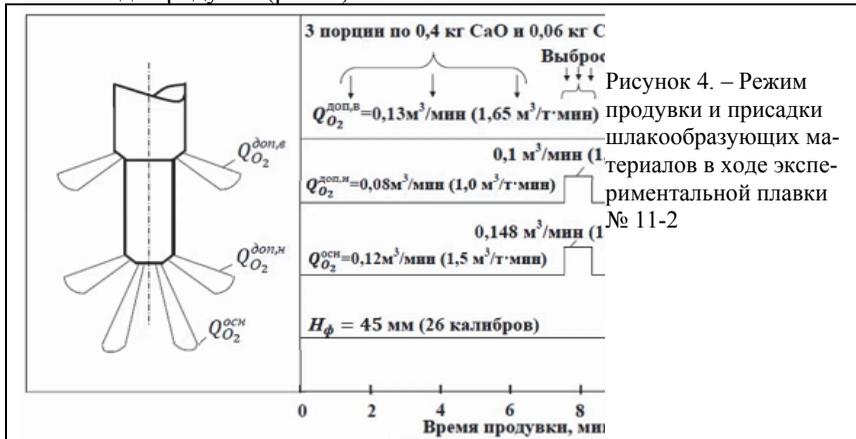
расчеты по которой и соответственно CO_2 для различных уравнений активности FeO в шлаке приведены на (рис.3 ,г). Условия для дожигания CO улучшаются при повышении активности оксидов железа в шлаке и пониженной температуре.

Если принять во внимание возможность организации дожигания отходящих газов в верхней части открытой реакционной зоны (рис.2) со свищевым каналным выходом газообразных продуктов реакций во вспененном слое шлакометаллической эмульсии, т.е. без тесного контакта с металлической и шлаковой фазами, то следует ожидать существенного повышения показателей дожигания.

Подача нейтрального перемешивающего газа снизу при комбинированной продувке конвертерной ванны (рис.2), с одной стороны, должна снизить показатели дожигания (рис. 3) из-за уменьшения P_{CO} и a_{FeO} , но с другой стороны в результате меньшего вспенивания шлака и возможности вести продувку с более высоким положением фурмы создаются более приятные условия для дожигания CO до CO_2 в кислородных струях.

В случае полной замены нейтральным газом верхних кислородных струй, предназначенных для дожигания отходящих газов, в определенные периоды операции также можно осаживать чрезмерно вспенившийся шлак и снижать температуру последнего, что должно способствовать повышению эффективности дожигания CO до CO_2 без агрессивного воздействия высокотемпературных факелов на футеровку конвертера.

В ходе высокотемпературного моделирования продувки конвертерной ванны через трехъярусную кислородную фурму и присадки шлакообразующих материалов по заранее составленной программе (рис. 4) получены сведения о динамике изменения химического состава и температуры металла в ходе продувки (рис. 5).



Анализ непрерывной 12-минутной видеосъемки хода продувки плавки позволил выделить 3 основных периода, принципиально отличающихся

между собой характером протекающих на поверхности конвертерной ванны физико-химических процессов, а именно: начальный период наводки шлака и растворения шлакообразующих; основной период интенсивного обезуглероживания ванны; заключительный период продувки с падением скорости обезуглероживания.

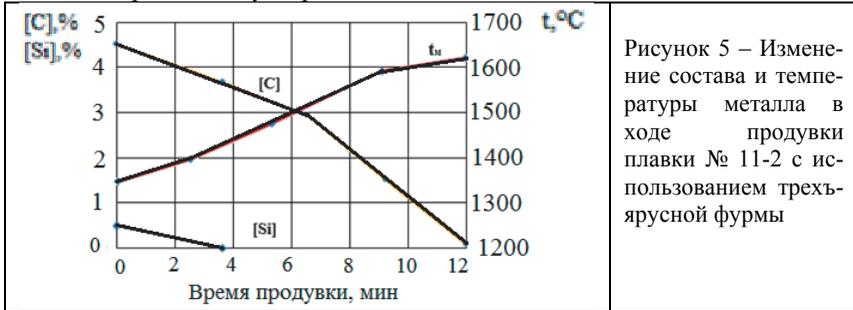


Рисунок 5 – Изменение состава и температуры металла в ходе продувки плавки № 11-2 с использованием трехъярусной фурмы

На протяжении начального периода продувки, занимающего до 25 % времени операции при неизменных значениях расходов основного и дополнительного кислорода и высоты фурмы над ванной (рис. 4), осуществляется после устойчивого «зажигания» плавки при достаточно глубоком проникновении сверхзвуковых кислородных струй в расплав чугуна наводка основного окислительного жидкоподвижного шлака при порционной присадке требуемого количества извести и плавикового шпата.

В результате добавок указанных материалов и дальнейшего поступления в шлак продуктов окисления шлакообразующих примесей и железа чугуна количество шлака увеличивается с постепенным приближением к внешней границе реакционной зоны (рис. 6).

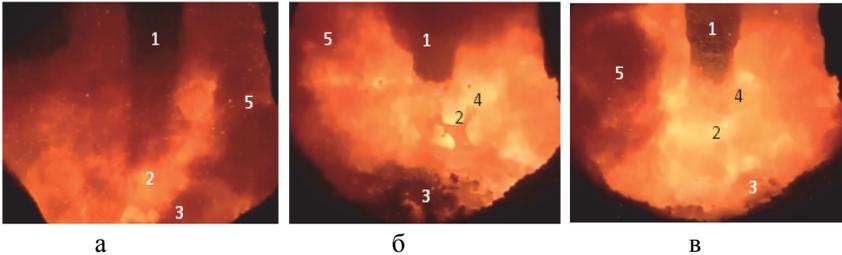


Рисунок 6. – Картина поведения конвертерной ванны в начальный период продувки ($\tau_{\text{прод}}$ до 3 мин 30 с.): 1 — трехъярусная фурма; 2 — реакционная зона взаимодействия кислородных струй с расплавом чугуна; 3 — кусковые известь и плавиковый шпат на поверхности ванны; 4 — выход CO из реакционной зоны; 5 — выход бурого дыма

Выделение из конвертерной ванны монооксида углерода идет в основном из пределов реакционной зоны непосредственного взаимодействия сверхзвукового кислородного дутья с металлическим расплавом. При ма-

лом шлаковым покрове имеет место раздельный или объединенный периодический выход на поверхность ванны объемов СО в виде пузырей, образующихся во вторичных реакционных зонах взаимодействия основных сверхзвуковых кислородных струй с расплавом. Эпизодически наблюдается образование укрупненных газовых объемов (макропузырей СО), что вероятно связано со слиянием в процессе всплывания более мелких пузырей.

После растворения в шлаке первых двух порций извести и плавикового шпата уровень вспененной шлакометаллической эмульсии располагался вблизи торца наконечника фурмы (рис. 7, а-в). При этом видеосъемкой фиксировался выход из пределов реакционной зоны взаимодействия сверхзвуковых кислородных струй с металлическим расплавом макропузырей СО с определенной частотой. Процесс дожигания СО до СО₂ осуществлялся звуковыми кислородными струями при непосредственном воздействии образующихся факелов дожигания на поверхность шлака.

Приближение уровня вспененной шлакометаллической эмульсии к верхнему сопловому блоку трехъярусной фурмы совпало (рис.7, г-е) с началом периода интенсивного обезуглероживания ванны при повышенной до 1440°С температуре.

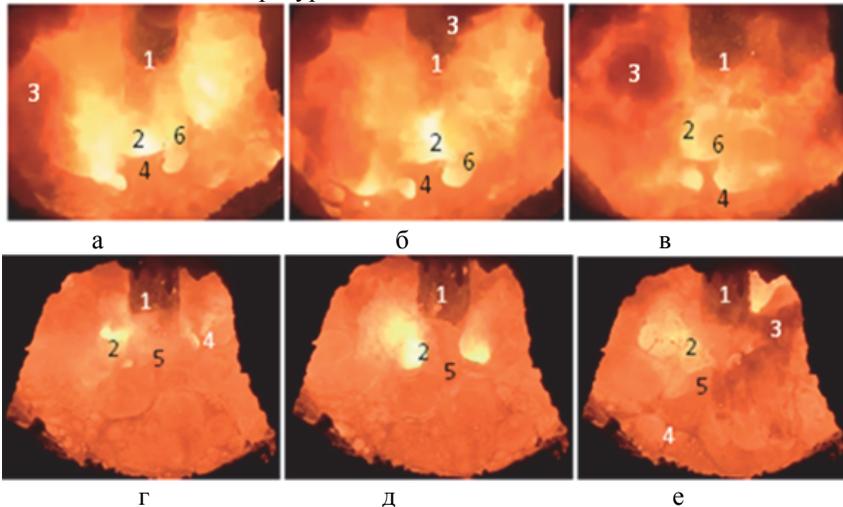


Рисунок 7. – Картина поведения конвертерной ванны в основной период продувки ($\tau_{\text{прод.}}$ до 10 мин 40 с.): 1 – трехъярусная фурма; 2 – факела дожигания СО до СО₂; 3 – выход бурого дыма; 4 – всплески шлака; 5 – волна шлакометаллической эмульсии; 6 – раскрытие макропузыря

Продувка протекала в режиме полного заглубления во вспененную шлакометаллическую эмульсию звуковых кислородных струй, истекающих из верхнего соплового блока. При этом зарождение в пределах вторичных реакционных объемов СО, последующее их укрупнение и всплывание,

совмещенное с дожиганием СО до CO_2 внутри их полости, сопровождается первоначальным увеличением высоты слоя вспененного шлака в околофурменной зоне с последующим ее снижением после выхода на поверхность и разрушения макропузыря.

При дожигании СО до CO_2 в объеме вспененного шлака высокотемпературные газообразные продукты химических реакций передают тепло окружающей макропузырь шлакометаллической эмульсии, которая в перегретом состоянии выносится на поверхность ванны и участвует в процессе передачи тепла дожигания через шлак к металлической ванне.

Третий период продувки – заключительный (рис.8). Он развивается с падением скорости обезуглероживания и понижением содержания углерода в ванне до 0,08 – 0,15 %. Скорость обезуглероживания в этот период уменьшается пропорционально снижению концентрации углерода в расплаве до 0,03 – 0,04 %, избыток кислорода в виде оксидов железа поступает в шлак, что вызывает потери выхода жидкого железистого полупродукта, увеличивает скорость износа футеровки конвертера, но одновременно интенсифицирует процесс дефосфорации. Этот период характеризуется расположением уровня шлакометаллической эмульсии ниже торца наконечника фурмы; снижением интенсивности дожигания СО до CO_2 и гидрогазодинамических процессов на поверхности ванны.

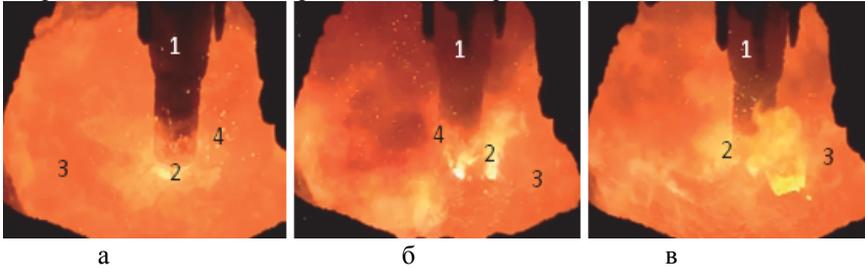


Рисунок 8. – Картина поведения конвертерной ванны в заключительный период продувки ($\tau_{\text{прод.}}$ 11 мин 45 с): 1- трехъярусная фурма; 2- выход СО из пределов реакционной зоны; 3- поверхность шлака; 4- всплески шлака

Выводы. Выполненные термодинамические расчеты свидетельствуют в пользу организации открытой формы реакционной зоны воздействия сверхзвукового кислородного дутья на конвертерную ванну при вспененной шлакометаллической эмульсии со «свищевым» выходом из нее монооксида углерода и дожиганием последнего встречно направленными дозвуковыми и звуковыми кислородными струями.

В ходе высокотемпературного моделирования установлено, что процесс продувки конвертерной ванны кислородом с применением трехъярусной кислородной фурмы можно условно разделить на три характерных периода. При этом все они отличаются друг от друга интенсивностью и характером протекания физико-химических превращений, что значительно

влияет на характер гидродинамических процессов протекающих на поверхности ванны.

Определено, что повышению эффективности дожигания СО до СО₂ в полости конвертера с применением трехъярусной фурмы способствует продувка конвертерной ванны, обеспечивающая внедрение в ванну основных сверхзвуковых кислородных струй, формирующих открытую реакционную зону с выходом из ее пределов вдоль ствола фурмы объединенного потока СО, который частично дожигается до СО₂ дополнительными дозвуковыми и звуковыми кислородными струями, истекающими из цилиндрических сопел, размещенных на двух ярусах. При этом, благодаря созданию своеобразной кислородной завесы над зоной продувки, снижается интенсивность выноса мелких капель металла и шлака на ствол фурмы и горловину конвертера, что способствует предотвращению интенсивного заматывания поверхности последних.

1. *Смоктый В.В., Лапицкий В.В., Белокуров Э.С.* Комбинированные процессы выплавки стали в конвертерах. – К.: Техніка, 1992. – 163 с.
2. *Чернятевич А.Г.* Направления совершенствования комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом // Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Вып. 28. – 2014.– С. 147-160.
3. *Комбинированная* продувка 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.
4. *Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я.* К вопросу горячего моделирования кислородно–конвертерного процесса // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. –1978. – №4.– С.40–45.
5. *Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В.* Разработка наконечников двухконтурных фурм для кислородных конвертеров // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1995. – № 12. – С. 13-17.
6. *Меджибожский М.Я.* Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов.-Киев-Донецк; Вища школа,1979. – 277с.
7. *Кубашевский О., Олкокк С.В.* Металлургическая термохимия. –М.:Металлургия, – 1982. – 392 с.
8. *Охотский В.Б., Чернятевич А.Г., Просвирин К.С.* Зона преимущественного рафинирования металла при продувке ванны кислородом // Сталеплавильное производство (тематический отраслевой сборник № 3, МЧМ СССР). М.: Металлургия, 1974. – С.75-82.
9. *Температура* реакционной зоны при прямом окислении стальной ванны кислородом / Л.С. Бейтельман, Б.Н. Огороков, В.И. Явойский, Л.М. Ефимов // Известия АН СССР. Металлы. – 1966. – №4. – С.20-25.

*Статья поступила в редакцию сборника 25.01.2017
и прошла внутреннее и внешнее рецензирование*

А.Г.Чернятевич, Л.С.Молчанов, П.О.Юшкевич, М.К.Чубін

Термодинамічне і високотемпературне моделювання комбінованої продувки конвертерної ванни з використанням триярусної кисневої фурми

Шляхом термодинамічного і високотемпературного моделювання комбінованої продувки конвертерної ванни з використанням верхньої триярусної кисневої фурми обґрунтовано підвищення ефективності допалення СО до СО₂ у порожнині конвертера із запобіганням локального зносу футеровки, інтенсивного заметалювання фурми та горловини агрегату.

Ключові слова: термодинамічне і високотемпературне моделювання, продувка конвертерної ванни, триярусна киснева фурма

A.G. Chernyatevich, L.S. Molchanov, P.O. Yushkevich, M.K. Chubin

Thermodynamic and high-temperature simulation of converter bath combined blowing by a three-level oxygen lance

In our research, we focus on justification of the increase in the post-combustion efficiency of CO to CO₂ in the converter working volume along with the prevention of the local wear of the lining, intensive scraping of the lance and the converter throat. By the means of thermodynamic and high-temperature simulation of the converter bath combined blowing with the top three-level oxygen lance, we show that there is feasibility for more effective CO-to-CO₂ post-combustion.

Key words: thermodynamic and high-temperature modeling, blowing of the converter bath, three-level oxygen lance.