

## Высокотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны с применением трехъярусной фурмы

*Представлены результаты высокотемпературного моделирования продувки конвертерной ванны с применением трехъярусной фурмы. Определены основные физико-химические явления в рабочем пространстве конвертера при различных режимах верхней продувки конвертерной ванны кислородом с применением трехъярусной фурмы.*

**Ключевые слова:** конвертерная ванна, кислородная продувка, трехъярусная фурма, факелы дожигания, обезуглероживание, макропузыри, всплески, выбросы.

**В**ведение. На сегодняшний день закуплены и внедрены в конвертерных цехах Украины (ПАО «АМК», ПАО «ДМК»), в рамках технического перевооружения, зарубежные конструкции фурменных дутьевых устройств и технологии комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом сверху и нейтральным перемешивающим газом ( $N_2$ , Ar) через днище. Данные технические решения не позволили решить основные проблемы современного конвертерного процесса [1]: снижение эффективности шлакообразования, дефосфорации и десульфурации металла при работе со шлаками, имеющими повышенное содержание оксида магния; ухудшение теплового баланса плавки; интенсивное заматалливание технологического оборудования (ствола кислородной фурмы, горловины конвертера и экранных поверхностей камина); снижение выхода железоуглеродистого полупродукта и производительности конвертерных агрегатов.

В свое время ускорение шлакообразования, улучшение теплового баланса конвертерной плавки и снижение интенсивности заматалливания технологического оборудования достигалось при комбинированной продувке [2, 3] с применением двухъярусных кислородных фурм. При этом, за счет дополнительного прихода тепла в результате частичного дожигания CO до  $CO_2$  в рабочем пространстве конвертера, с одной стороны, обеспечивалось увеличение доли перерабатываемого металлолома и предотвращение интенсивного заматалливания ствола фурмы и горловины агрегата, а с другой – значительное снижение стойкости футеровки конвертера [2, 3].

С целью минимизации негативного воздействия высокотемпературных факелов дожигания CO до  $CO_2$  на футеровку конвертера предложено использование новой конструкции трехъярусной фурмы [1], с системой подвода к ней двух независимо регулируемых потоков основного и дополнительного кислорода. В этой связи важными являются сведения об особенностях физико-химических явлений, протекающих в ходе продувки конвертерной ванны через трехъярусную фурму сверх- и звуковыми кислородными струями.

**Постановка задачи.** Целью исследования является установление особенностей продувки и физико-хи-

мических явлений в рабочем пространстве конвертера при разных режимах верхней продувки конвертерной ванны кислородом с использованием трехъярусной фурмы, предназначенной обеспечить спокойный ход плавки без интенсивных выбросов и выносов, повышение эффективности дожигания CO до  $CO_2$  в пределах специально создаваемых реакционных зон без агрессивного воздействия высокотемпературных факелов дожигания на футеровку агрегата.

**Методика проведения исследований.** Исследования проводили на смонтированной с учетом приобретенного опыта [4] установке, включающей 60-килограммовый конвертер, снабженный съемной горловиной с окном для фиксации хода продувки видеокамерой со скоростью 300 кадр/с.

Для верхней продувки конвертерной ванны использовалась трехъярусная водоохлаждаемая кислородная фурма, снабженная нижним двухрядным 12-ти сопловым наконечником, включающим 4 сопла Лавалля критического диаметра 1,7 мм, расположенных во внутреннем ряду под углом ( $\alpha_1$ )  $12^\circ$  к вертикальной оси фурмы, и 8 цилиндрических сопел диаметром 1 мм, находящихся в наружном ряду под углом ( $\alpha_2$ )  $30^\circ$ . На удалении 105 мм от торца наконечника расположен верхний сопловый блок, включающий 8 цилиндрических сопел диаметром 1 мм под наклоном ( $\alpha_3$ )  $30^\circ$  к вертикали. Двухрядный наконечник спроектирован с использованием разработанной методики [5].

Жидкий низкомарганцовистый чугуны, имеющий химический состав, %: 4,05–4,50 – C, 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 °C, готовили в кислом тигле 160-килограммовой индукционной печи с учетом теплопотерь за время заливки чугуна в конвертер.

Порядок продувки чугуна кислородом через трехъярусную фурму с вводом кусковых (фракция 10–12 мм) извести и плавикового шпата в ходе эксперимента изменялся по заранее составленной программе (рис. 1). 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 шла-

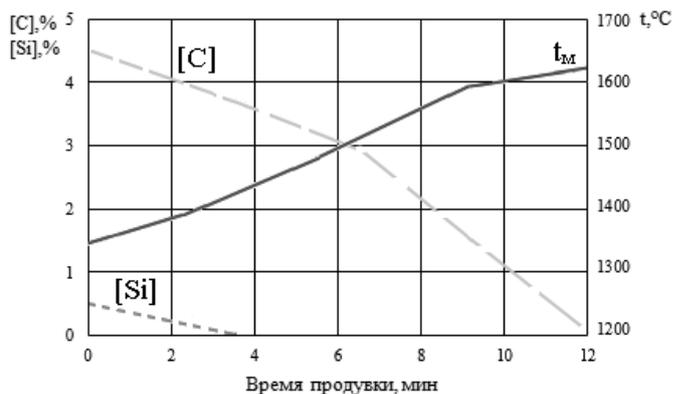
кового режимов ведения плавки температура расплава возрастала в ходе продувки с первоначальных 1300–1340 до 1610–1630 °С по окончании операции продувки.

**Результаты исследования.** В ходе выполнения исследований получены сведения о динамике изменения химического состава и температуры металла в ходе продувки при применении трехъярусной фурмы (рис. 2).

Обработка полученных в ходе плавки видеоматериалов позволила впервые получить достоверную информацию об особенностях физико-химических процессов, развивающихся на поверхности конвертерной ванны в ходе кислородной продувки через трехъярусную фурму. 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.

На протяжении начального периода продувки, занимающего до 25 % времени операции при неизменных значениях расходов основного и дополнительного кислорода и высоты фурмы над ванной (рис. 1), 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 (рис. 1).

В данный период продувки [6] во вторичной реакционной зоне ( $II_{p.з.}$ ), в соответствии с более благоприятными термодинамическими условиями, развивается преимущественное окисление кремния и марганца, и продукты реакций в виде железомарганцовистых силикатов и неиспользованной части оксидов железа всплывают на поверхность ванны, оттесняются пото-



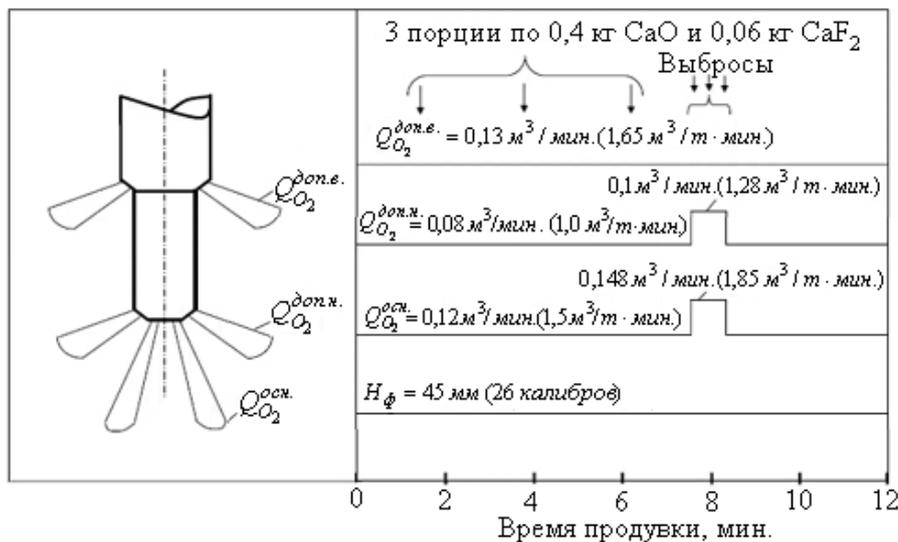
**Рис. 2.** Изменение состава и температуры металла в ходе продувки плавки № 11-2 с использованием трехъярусной фурмы

ком выходящего монооксида углерода к стенкам конвертера и вступают во взаимодействие с присадками кусковой 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. 3).

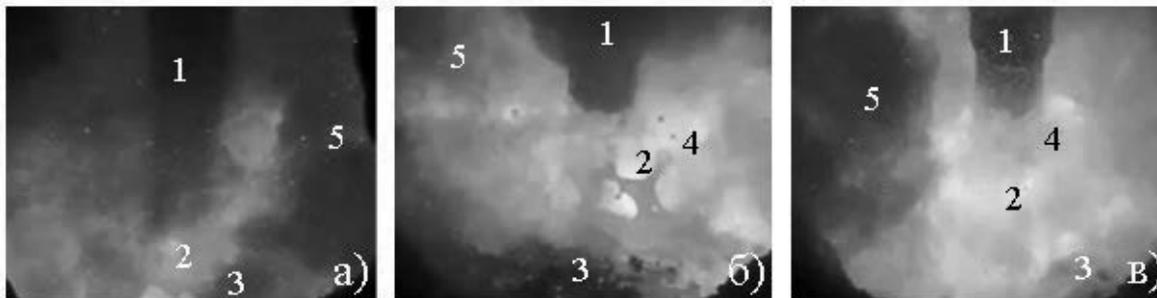
Выделение из конвертерной ванны монооксида углерода идет в основном из пределов реакционной зоны непосредственного взаимодействия сверхзвукового кислородного дутья с металлическим расплавом. При малом шлаковом покрове имеет место раздельный или объединенный периодический выход на поверхность ванны объемов 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.

Наблюдаемое возрастание выделения бурого дыма в начальный период плавки (рис. 3) обусловлено постепенной интенсификацией обезуглероживания в реакционной зоне по мере окисления кремния, марганца и повышения температуры расплава [7], а также отсутствием фильтрующего воздействия на выходящий запыленный поток СО формирующегося слоя шлака. В начальный промежуток плавки (до  $\tau_{\text{прод.}}$  2 мин 30 с.) не зафиксировано дожигание выделяющегося из реакционной зоны СО звуковыми кислородными струями, истекающими из верхнего соплового блока, что, по-видимому, связано с недостаточно интенсивным выходом из пределов реакционной зоны содержащих монооксид углерода газов.

После растворения в шлаке первых двух порций извести и плавикового шпата уровень вспененной шлакометаллической эмульсии располагался вблизи торца наконечника фурмы (рис. 4, а–в).



**Рис. 1.** Режим продувки и присадки шлакообразующих материалов в ходе экспериментальной плавки № 11-2



**Рис. 3.** 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

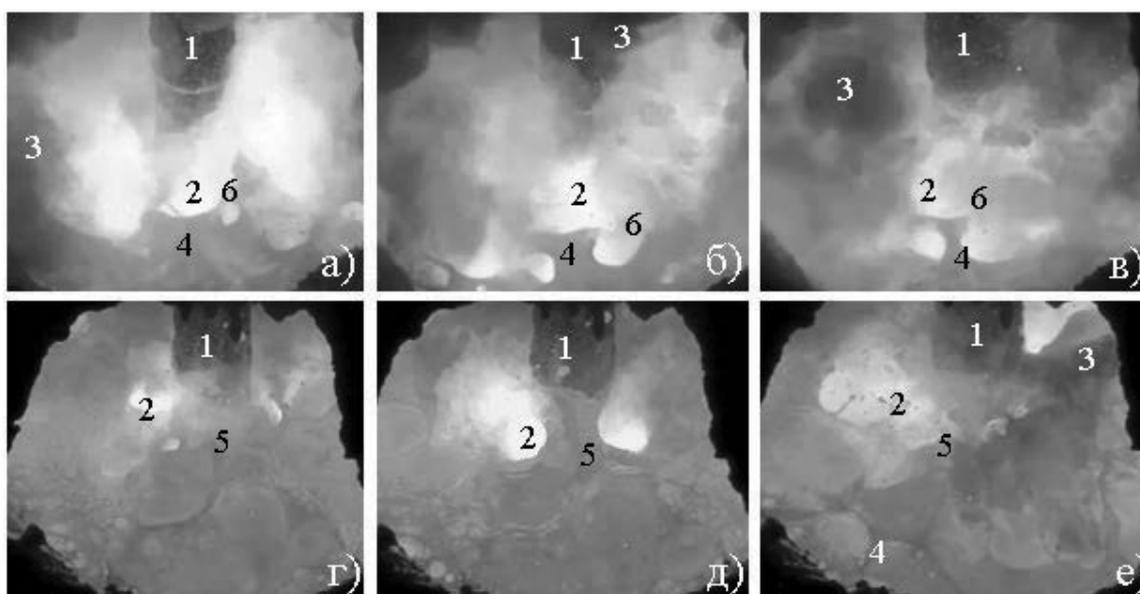
При этом видеосъемкой фиксировался выход из пределов реакционной зоны взаимодействия сверхзвуковых кислородных струй с металлическим расплавом макропузырей CO с определенной частотой. Процесс дожигания CO до CO<sub>2</sub> осуществлялся звуковыми кислородными струями при непосредственном воздействии образующихся факелов дожигания на поверхность шлака.

Приближение уровня вспененной шлакометаллической эмульсии к верхнему сопловому блоку трехъярусной фурмы совпало (рис. 4, а–е) с началом периода интенсивного обезуглероживания ванны при повышенной до 1440 °C температуре. 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 CO, последующее их укрупнение и всплывание, совмещенное с дожиганием CO до CO<sub>2</sub> 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 CO до CO<sub>2</sub> 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.

При неизменной с начала плавки интенсивности подачи кислорода через трехъярусную фурму (рис. 2), отмечался спокойный, с отсутствием выбросов, характер продувки. В то же самое время в период интенсивного обезуглероживания ванны, путем кратковременного увеличения расхода основного кислорода, выбросы шлакометаллической взвеси через смотровое окно конвертера были преднамеренно спровоцированы (рис. 1).

Третий период продувки – заключительный (рис. 5). 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



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



**Рис. 5.** Картина поведения конвертерной ванны в заключительный период продувки ( $\tau_{\text{прод.}}$  до 12 мин): 1 – трехъярусная фурма; 2 – выход CO из пределов реакционной зоны; 3 – поверхность шлака; 4 – всплески шлака

жидкого железоуглеродистого полупродукта, увеличивает скорость износа футеровки конвертера, но одновременно интенсифицирует процесс дефосфорации.

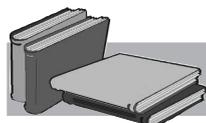
Этот период характеризуется снижением уровня шлакометаллической эмульсии до расположения ниже торца наконечника фурмы; снижением интенсивности дожигания CO до CO<sub>2</sub> и гидрогазодинамических процессов на поверхности ванны.

### Выводы

В ходе выполнения исследований установлено, что процесс продувки металлической ванны кисло-

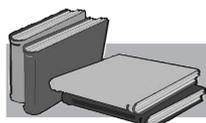
родом с применением трехъярусной кислородной фурмы можно условно разделить на три характерных периода. При этом все они отличаются друг от друга интенсивностью и характером протекания физико-химических превращений, что значительно влияет на характер гидродинамических процессов, протекающих на поверхности ванны.

Определено, что повышению эффективности дожигания CO до CO<sub>2</sub> в полости конвертера с применением трехъярусной фурмы способствует продувка конвертерной ванны, обеспечивающая внедрение в ванну сверхзвуковых кислородных струй, формирующих открытую реакционную зону с выходом из ее пределов вдоль ствола фурмы объединенного потока CO.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Чернятевич А. Г., Юшкевич П. О. Комбинированная продувка конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом // Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра. URL: <http://www.fhotm.kpi.ua/labours/labours-2015.pdf>.
2. Смоктий В. В., Лапицкий В. В., Белокуров Э. С. Комбинированные процессы выплавки стали в конвертерах. – К.: Техніка, 1992. – 163 с.
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. Чернятевич А. Г. Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 1 // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 4. – С. 24–31.
7. Исследование динамики пылеобразования в кислородном конвертере / Ю. И. Шиш, А. Г. Чернятевич, Ю. А. Коржавин и др. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1991. – № 4. – С. 45–48.



## REFERENCES

1. Cherniatevich A. G., Yushkevich P. O. Kombinirovannaya produvka konvertvernoi vanny kislorodom i neutral'nym gazom [The combined purge of a converter bathtub by oxygen and neutral gas]. Spetsialnaia metallurgii: vchera, segodnia, zavtra. URL: <http://www.fhotm.kpi.ua/labours/labours-2015.pdf> [in Russian].
2. Smoktii V. V., Lapitskii V. V. Belokurov E. S. (1992). Kombinirovannye protsessy vyplavki stali v konverterakh [The combined processes of smelting steel in converters]. Kyiv: Tekhnika, 163 p. [in Russian].
3. Cherniatevich A. G., Aizatulov R. S., Uchitel' L. M. et al. (1989). Kombinirovannaya produvka s podachei neutral'nogo gaza sverkh i cherez dnishche konvertera [The combined purge with supply of neutral gas from above and through the converter bottom]. Stal', no. 5, pp. 20–23 [in Russian].
4. Cherniatevich A. G., Zarvin E. Ya. (1978). K voprosu goriachego modelirovaniia kislorodno-konverternogo protsessa [To the question of hot modeling of oxygen and converter process]. Izv. VUZov. Chernaia metallurgii, no. 4, pp. 40–45 [in Russian].

5. Cherniatevich A. G., Protopopov E. V. (1995). Razrabotka nakonechnikov dvukhkonturnykh furm dlia kislorodnykh konverterov [Development of dual tipped lances for BOF]. Izv. VUZov. Chernaia metallurgii, no. 12, pp. 13–17 [in Russian].
6. Cherniatevich A. G. (2015). Razrabotka dut'evogo i shlakovogo rezhimov konverternoi plavki pri verkhnei kislorodnoi produvke. Soobshchenie 1 [Development of blast and slag modes of converter melting at the top oxygen blowing. Message 1]. Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost', no. 4, pp. 24–31 [in Russian].
7. Shysh Yu. I., Cherniatevich A. G., Korzhavin Yu. A. et al. (1991). Issledovanie dinamiki pyileobrazovaniia v kislorodnom konvertere [Study of the dynamics of dust formation in the BOF]. Izv. VUZov. Chernaia metallurgii, no. 4, pp. 45–48 [in Russian].

## Анотація

*Чернятевич А. Г., Молчанов Л. С., Юшкевич П. О.*

Високотемпературне моделювання продувки конвертерної ванни з використанням триярусної фурми

*Представлено результати високотемпературного моделювання продувки конвертерної ванни з використанням триярусної фурми. Визначено основні фізико-хімічні явища в робочому просторі конвертера при різних режимах верхньої продувки конвертерної ванни киснем з використанням триярусної фурми.*

## Ключові слова

*Конвертерна ванна, киснева продувка, триярусна фурма, факели допалювання, зневуглювання, макробульби, сплески, викиди.*

## Summary

*Cherniatevich A., Molchanov L., Yushkevich P.*

High temperature modeling of BOF bath blowing by using three-level oxygen lance

*The results of high temperature modeling of BOF bath blowing by using three-level oxygen lance are shown. The basic physical and chemical phenomena in the BOF workspace for different regimes of top blowing of BOF bath by oxygen with using three-level lance were defined.*

## Keywords

*BOF bath, oxygen blowing, three-level lance, post-combustion torches, decarburization, macrobubbles, splashes, ejections.*

Поступила 15.06.17