

Результаты лабораторного исследования энергоэффективной технологии продувки конвертерной ванны с применением трехъярусной фурмы

П. О. Юшкевич¹⁾, Л. С. Молчанов¹⁾

¹⁾ *Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. академика Стародубова, 1, 49050, г. Днепр, Украина*

Article info:

Paper received:

April 22, 2017

The final version of the paper received:

May 17, 2017

Paper accepted online:

May 21, 2017

Correspondent Author's Address:

isi.dps.jr@gmail.com

На основании анализа преимуществ и недостатков кислородно-конвертерного производства Украины с комбинированной продувкой ванны кислородом и нейтральным газом предложена новая технология комбинированной продувки с использованием трехъярусной фурмы, обеспечивающая сохранение стойкости футеровки конвертера и более эффективное дожигание отходящих газов с предотвращением локального износа футеровки и интенсивного заметалливания ствола фурмы и горловины агрегата.

В ходе лабораторно-промышленной проработки предложенной технологии установлено, что в зависимости от уровня расположения шлакометаллической эмульсии можно выделить два основных режима дожигания. Процесс дожигания необходимо организовывать таким образом, чтобы факелы находились в пределах полудиаметра области выхода потока CO, благодаря чему не допускается воздействие факелов на футеровку конвертера.

Ключевые слова: конвертер, комбинированная продувка кислородом и нейтральным газом, трехъярусная фурма, дожигание отходящих газов, энергосбережение.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире около 80 % конвертерной стали выплавляется по технологии комбинированной продувки ванны кислородом сверху и нейтральным перемешивающим газом (азот, аргон) через днище [1, 8, 11], которая, обеспечивает следующие преимущества по сравнению с классическим кислородно-конвертерным процессом с верхней подачей кислорода:

- увеличение интенсивности подачи кислорода и уменьшение длительности продувки;
- более спокойный характер продувки с отсутствием интенсивных выбросов шлакометаллической взвеси из агрегата;
- повышение стабильности по температуре и химическому составу от плавки к плавке;
- уменьшение угара железа и окисленности металла на выпуске, увеличение остаточного содержания марганца, снижение расхода алюминия и ферросплавов и в итоге – повышение выхода жидкой стали;
- получение низких содержаний углерода и вредных примесей в конечном металлическом полупродукте.

В последние годы начавшееся в Украине и СНГ техническое перевооружение кислородно-конвертерного процесса реализуется в направлении закупки и установки зарубежного оборудования и технологий комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом сверху и нейтральным перемешивающим газом через днище [2, 3, 10].

1.1. Анализ литературных источников и постановка проблемы

Внедренная на металлургических предприятиях Украины (ПАО «АМК», ПАО «ДМКД») зарубежная технология комбинированной продувки, как оказалось, имеет один из существенных недостатков, связанный с ухудшением теплового баланса плавки. Такая же проблема наблюдается и в переоборудованных конвертерных цехах предприятий СНГ [2, 3, 10].

Дело в том, что для верхней продувки ванны 250–330 т конвертеров с расходом кислорода соответственно 1 050–1 200 м³/мин применяются кислородные фурмы классической конструкции с литыми наконечниками (рис. 1), содержащими 6 сопел Лавала, расположенными по кругу под углом наклона к вертикальной оси фурмы 17 и 20°.

В условиях комбинированной продувки при оснащении фурм наконечником рис. 1 ухудшаются тепловые условия ведения плавки, из-за ограничения развития экзотермических реакций окисления примесей и подачи холодного нейтрального газа [1, 4, 7, 11]. Это сопровождается уменьшением количества перерабатываемого металлического лома и вводом в шихтовку конвертерной плавки дополнительных высокоуглеродистых энергоносителей. Использование внешних энергоносителей приводит к повышению экономических затрат и себестоимости готовой

продукции. Для устранения этого недостатка в свое время при продувке конвертерной ванны использовались двухъярусные кислородные фурмы [4–8], позволяющие наряду с продувкой ванны основными сверхзвуковыми кислородными струями осуществлять дожигание в полости конвертера отходящих газов, содержащих монооксид углерода, дополнительными дозвуковыми струями [6–8, 12]. В результате был существенно улучшен тепловой баланс конвертерной плавки. Вместе с тем воздействие образующихся высокотемпературных факелов дожигания CO до CO₂ на футеровку конвертера привело к ускоренному локальному износу последней, особенно в верхней цилиндрической и конической частях рабочего пространства агрегата. По этой причине использование двухъярусных фурм получило ограниченное применение.

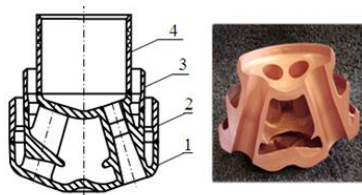


Рисунок 1 – Конструкция наконечника фирмы «Impact»: 1 – литой сопловый блок; 2 – соединительная вставка с наружной трубой отвода воды; 3 – соединительная вставка с промежуточной трубой подвода воды; 4 – соединительная вставка с центральной трубой подвода кислорода

1.2. Цель работы

Изучение процессов дожигания CO до CO₂ в рабочем пространстве лабораторного конвертера при продувке верхней трехъярусной фурмой.

Разработка новых технических и технологических решений, направленных на улучшение энергоэффективности существующей технологии комбинированной продувки, с учетом результатов проведенных исследований.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Предложенные технические решения

Для улучшения теплового баланса плавки предлагается оснастить конвертерные агрегаты новой конструкцией трехъярусной фурмы и системами подвода к ней двух регулируемых потоков кислорода с возможностью их полной замены на азот. В результате появляется возможность обеспечить продувку конвертерной ванны в режиме глубокого проникновения в металлический расплав основных сверхзвуковых кислородных струй, истекающих из сопел Лавала цельноблочного наконечника трехъярусной фурмы, при перекрытии торца последнего слоем вспененной шлакометаллической эмульсии. При этом интенсифицируются процессы растворения присаженного лома, обезуглероживания и перемешивания ванны. Одновременно дополнительными дозвуковыми кислородными струями, формируемыми цилиндрическими соплами, расположенными в верхнем и нижнем продувочных блоках создается обширная и относительно низкоскоростная область кислородных потоков на пути встречного потока монооксида углерода, преимущественно выходящего из реакционной зоны взаимодействия основных кислородных струй с расплавом. Эта область в зависимо-

сти 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 агрегата. Дожижение отходящих конвертерных газов способствует улучшению теплового баланса ведения плавки, позволяет обеспечить требуемую температуру металла на выпуске.

Дожижение {CO} до {CO₂} обеспечивает тепловой эффект, в три раза больший, чем углерода (C) до {CO}, и развивает температуру в образуемом факеле до 3 113–3 273 K [1].

2.2. Исследование новой технологии продувки

Проведение исследований технологии продувки, позволяющей улучшить тепловой баланс, осуществлялось на разработанной с учетом приобретенного опыта [13] установке для высокотемпературного моделирования в виде 60 кг конвертера (рис. 2 а), снабженного съемной горловиной с окном для фиксации хода продувки видеокамерой со скоростью 300 кадров/с и верхней трехъярусной фурмой (рис. 2 б).

Трехъярусная кислородная фурма была оснащена двумя трактами подведения технологических газов, обеспечивающих отдельный подвод кислорода на верхний ярус и общий – на нижние ярусы. Высота расположения верхней фурмы на протяжении всей продолжительности продувки составляла 45 калибров (критических диаметров сопла Лавала) относительно спокойного состояния поверхности расплава, находящегося в ванне лабораторного конвертера.

Время продувки конвертерной ванны составляло 10–15 минут. По ходу проведения продувки производилось 3 присадки шлакообразующих материалов, присадки осуществлялись при помощи специально изготовленного совка до 6-й минуты продувки, первая присадка проводилась в конце 1-й минуты, вторая – до 3-й минуты и третья – до 6-й, каждая порция содержала 0,4 CaO и 0,06 CaF₂.

Во время продувки осуществлялся отбор проб металла и шлака при помощи заранее подготовленных пробниц. Также был произведен отбор проб отходящих конвертерных газов перед их выходом из дымоотводящего тракта лабораторной установки. Отбор проб металла, шлака и отходящих газов осуществлялся через каждые 3 минуты продувки.

Оценка эффективности дожигания отходящих газов при продувке трехъярусной фурмой конвертерной ванны производилась при помощи определения степени дожигания из следующего выражения [14]:

$$\eta_{co} = \frac{CO_2}{(CO_2 + CO)} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где η_{co} – степень дожигания CO, %; CO₂ – содержание CO₂ в составе отходящих газов, %; CO – содержание CO в составе отходящих газов, %.

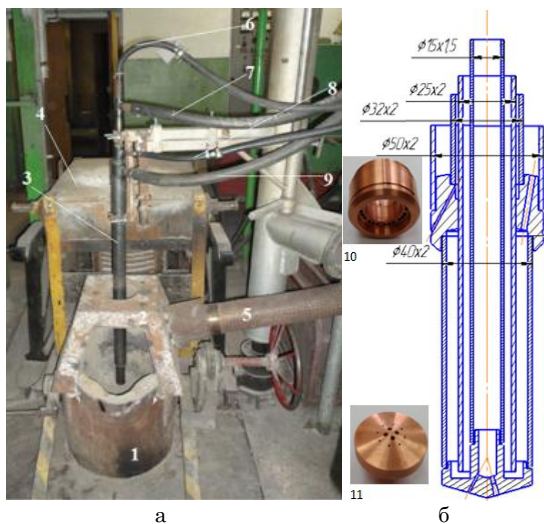


Рисунок 2 – Вид установки (а) и схема трехъярусной фурмы (б) для проведения высокотемпературного моделирования: 1 – корпус конвертера; 2 – съемная горловина; 3 – трехъярусная кислородная фурма; 4 – 160 кг индукционная печь; 5 – металлошланговый рукав для эвакуации отходящих газов; 6, 8 – шланги подвода основного и дополнительного кислорода к трехъярусной фурме; 7, 9 – шланги подвода и отвода воды на охлаждение фурмы; 10 – нижняя двухрядная головка; 11 – верхний сопловый блок

Помимо отбора проб в ходе эксперимента, производились замеры температуры расплава и образующих факелов дожигания распространяющихся в пределах рабочего пространства лабораторного конвертера. Замеры температуры расплава осуществляли при помощи термопары ПР-6/30 путем ее погружения в расплав. Определение температуры в факелах дожигания при помощи пирометра, собранного на базе измерительного комплекса «Сапфир» путем его наведения на область расплава, перекрываемую образующимся факелом дожигания. Временной интервал между замерами температуры расплава составлял 3 минуты.

Ход эксперимента сопровождался поминутной регистрацией параметров (расхода и давления) при помощи ротаметра РС-5 и манометра МДМ-25 располагаемых как перед продувочными устройствами, так и в магистрали.

Обработка полученных в ходе высокотемпературного моделирования видеоматериалов позволила установить, что при использовании трехъярусной фурмы можно выделить 2 основных режима дожигания, представленных на рис. 3.

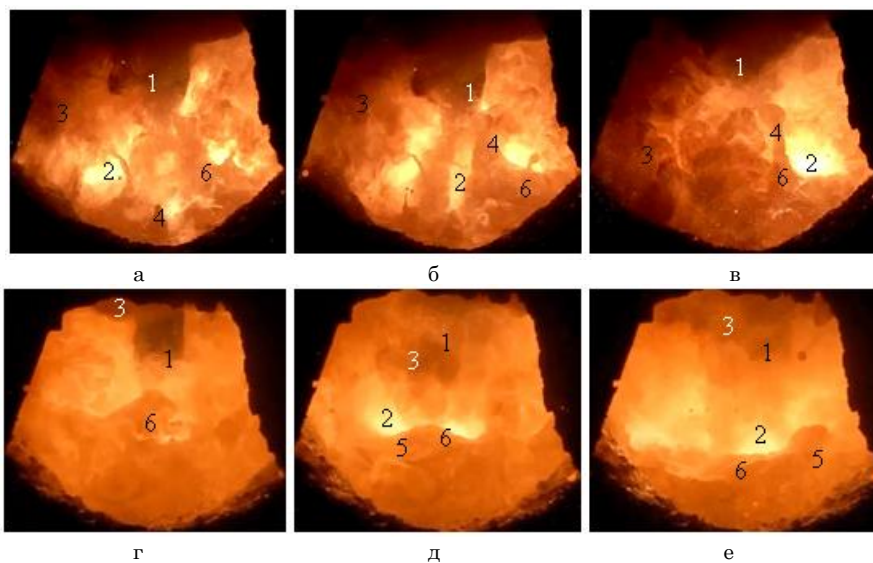


Рисунок 3 – Основные режимы дожигания отходящих конвертерных газов при использовании трехъярусной фурмы: 1 – трехъярусная фурма; 2 – факелы дожигания CO до CO₂; 3 – выход бурого дыма; 4 – всплески шлака; 5 – волна шлакометаллической эмульсии; 6 – раскрытие макропузыря

Первый (рис. 3 а–в) наблюдается в период интенсивного обезуглероживания конвертерной ванны при расположении уровня вспененного шлака ниже верхнего соплового блока трехъярусной фурмы. В этом случае видеосъемкой фиксировался выход с определенной частотой из пределов реакционной зоны взаимодействия сверхзвуковых кислородных струй с металлическим расплавом макропузырей CO с дожиганием CO до CO₂ звуковыми кислородными струями при непосредственном воздействии образующихся факелов дожигания на поверхность шлака.

Дальнейшее повышение уровня вспененного шлака до верхнего яруса сопел (рис. 3 г–е) приводит

к переходу во второй режим дожигания, характеризуемый полным заглублением звуковых кислородных струй, истекающих из верхнего соплового блока, во вспененную шлакометаллическую эмульсию. В этих условиях зарождение в пределах вторичных реакционных объемов CO, последующее укрупнение и всплывание образующегося макропузыря, дожигание в нем CO до CO₂ сопровождаются первоначальным увеличением высоты вспененного слоя шлака в околофурменной зоне с последующим ее снижением после выхода и разрушения макропузыря на поверхности шлака. В этом случае высокотемпературные газообразные продукты реакции дожигания $CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2$ передают тепло окружающей мак-

ропузырь оболочке шлакометаллической эмульсии, которая в перегретом до более высокой температуры состоянии выносится на поверхность ванны и участвует в процессе передачи тепла от дожигаания через шлак к металлической ванне.

Обработка результатов химического анализа состава отходящих газов позволила установить, что продувка с использованием новой конструкции трехъярусной фурмы в среднем за плавку обеспечивает улучшение показателей процесса дожигаания на 54 % по сравнению с двухъярусной фурмой [6] (рис. 4).

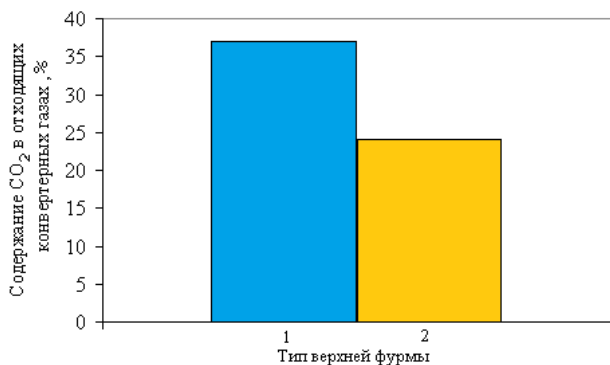


Рисунок 4 – Сопоставление средней степени дожигаания CO до CO₂ за плавку в отходящих конвертерных газах при продувке трехъярусной (1) и двухъярусной (2) фурмой

Повышению эффективности дожигаания CO до CO₂ в полости конвертера с применением трехъярусной фурмы способствует продувка конвертерной ванны, обеспечивающая глубокое внедрение в ванну основных сверхзвуковых кислородных струй, форми-

рующих открытую форму общей реакционной зоны с выходом из ее пределов вдоль ствола фурмы объединенного потока CO, в который встречно вдуваются дополнительные звуковые кислородные струи, истекающие из цилиндрических сопел верхних ярусов. При этом число цилиндрических сопел и расход кислорода через них выбираются из расчета:

- увеличения периферийного объема каждой из звуковых струй, в котором скорость кислорода находится в пределах 5–12 м/с, сопоставимых со скоростью распространения фронта пламени в смеси CO – CO₂;

- обеспечения дальнбойности высоко-температурных факелов дожигаания, сопоставимых с величиной полудиаметра области выхода на поверхность ванны потока CO (рис. 3), что предотвращает локальный износ футеровки конвертера.

На основании проведенных исследований и приобретенного производственного опыта [15, 16] с учетом выявленных недостатков продувки через двухъярусную фурму для условий работы отечественных конвертеров предложен новый вариант комбинированной продувки (рис. 5) с применением трехъярусной верхней фурмы, обеспечивающей вдувание дополнительного кислорода через цилиндрические сопла, размещенные на двух ярусах относительно торца наконечника.

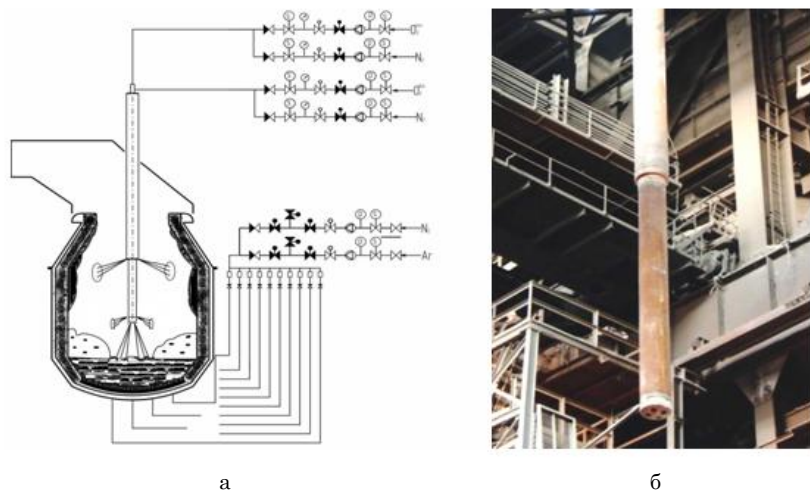


Рисунок 5 – Предлагаемая схема оснащения отечественных конвертеров регулируемым подводом технологических газов к верхней трехъярусной фурме и донным дутьевым устройствам (а); фото фурмы (б)

В случае предложенной технологии (рис. 5) рекомендуется:

- оснастить конвертера разработанной конструкцией трехъярусной фурмы повышенной стойкости, включающей: цельноточеный 12-канальный наконечник с двухъярусным расположением 4 сопел Лаваля ($d_{ср} = 34$ мм, $\alpha_1 = 12^\circ$) и 8-цилиндрических сопел ($d_u = 8$ мм, $\alpha_2 = 17^\circ$) и верхний цельноточеный 8-канальный блок с цилиндрическими соплами ($d = 8$ мм, $\alpha_1 = 35^\circ$), расположенный на расстоянии 2,5 мм от торца нижнего наконечника;

- обеспечить подвод к трехъярусной фурме двух регулируемых потоков основного (350–400 м³/мин) и дополнительного (15–50 м³/мин) кислорода с возможностью их полной замены на азот с теми же расходами;

- оборудовать конвертеры современной системой регулируемого подвода к каждой донной фурме нейтральных перемешивающих газов (азот, аргон), взамен многоканальных перейти на более дешевые и высоко-стойкие одноканальные дутьевые устройства.

Все это позволит при выбранных начальной и рабочей высотах фурмы над ванной:

– более эффективно перераспределять вдуваемый кислород на реакции с металлической, шлаковой и газовой фазами рабочего пространства конвертера, интенсифицировать процессы дожигания CO до CO₂, формирования основного шлака с оптимальной окисленностью и содержанием оксида магния с точки зрения окисления фосфора;

– управлять вспениванием шлака и организовывать на протяжении большей части времени плавки спокойную продувку с частичным дожиганием отходящих газов в режиме перекрытия вспененной шлакометаллической эмульсией нижнего наконечника фурмы с предотвращением интенсивных выбросов и «сворачивания» шлака;

– предотвращать интенсивное заметалливание ствола фурмы, конической части футеровки и горловины конвертера, а также локальный износ футеровки путем ликвидации воздействия на последнюю высокотемпературных факелов дожигания;

– обеспечивать снижение окисленности металла и шлака на окончательной стадии операции, особенно в случае вынужденных «додувок» плавки с целью обеспечения заданного состава и температуры расплава;

– организовывать без проблем нанесение шлакового гарнисажа на футеровку конвертера посредством раздува конечного шлака азотными струями, формируемыми соплами Лавалья нижнего

наконечника при максимальном расходе азота и минимальной подаче азота через цилиндрические сопла верхнего яруса во избежание их «запечатывания» брызгами шлака.

3. ВЫВОДЫ

Обработка видеоматериалов, полученных в ходе ведения экспериментов, позволила установить, что в процессе продувки конвертерной ванны с использованием трехъярусной фурмы может наблюдаться 2 основных режима дожигания.

Благодаря проведенному анализу химического состава отобранных проб отходящих газов в ходе эксперимента высокотемпературного моделирования продувки конвертерной ванны установлено, что использование трехъярусной фурмы может в среднем за плавку обеспечивать повышение эффективности дожигания CO до CO₂ на 54 % по сравнению с двухъярусной.

Полученная информация позволяет сформировать предложения для разработки новой технологии комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом с использованием трехъярусной фурмы, обеспечивающей улучшение теплового баланса плавки.

Report on laboratory research of power-efficient triple-nozzle tuyere oxygen lancing

P. O. Yushkevich¹, L. S. Molchanov²

¹ *Z. I. Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy, 1 Acad. Starodubova Sq., 49050, Dnipro, Ukraine*

Based on the analysis of the advantages and shortcomings of the oxygen-converter production in Ukraine with combined oxygen and neutral gas blowing, a new combined-blowing technology by a three-level lance has been proposed, which provides the prolongation of the converter lining stability and a more efficient post-combustion of the exhaust gases with the prevention of local wear of the lining and intensive scraping of the lance body and the unit mouth.

During the laboratory-industrial working-out of the proposed technology it was established that, depending on the level of the slag-metallic emulsion, two main post-combustion modes can be distinguished. The post-combustion process must be organized in such a way that the torches are within a half-diameter area of the outlet CO stream that prevents the torch's effect on the converter lining.

Keywords: converter, combined oxygen and neutral gas blowing, three-level lance, post-combustion of the exhaust gases, energy saving.

Результати лабораторного дослідження енергоефективної технології продування конвертерної ванни з використанням триярусної фурми

П. О. Юшкевич¹⁾, Л. С. Молчанов¹⁾

¹⁾ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, п.л. академіка Стародубова, 1, 49050, м. Дніпро, Україна

На підставі аналізу переваг та недоліків киснево-конвертерного виробництва України з комбінованим продуванням ванни киснем і нейтральним газом запропонована нова технологія комбінованого продування з використанням триярусної фурми, що забезпечує збереження стійкості футерування конвертера і більш ефективне допалювання газів, що відходять, із запобіганням локальному зношенню футерування та інтенсивному заметалюванню стовбура фурми й горловини агрегата.

У процесі лабораторно-промислових опрацювань запропонованої технології встановлено, що залежно від рівня розміщення шлакометалевої емульсії можна виділити два основні режими допалювання. Процес допалювання необхідно організувати таким чином, щоб факели знаходилися в межах півдіаметра області виходу потоку СО, завдяки цьому не допускається вплив факелів на футерування конвертера.

Ключові слова: конвертер, комбіноване продування киснем і нейтральним газом, триярусна фурма, допалювання газів, енергозбереження.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бойченко Б. М. Конвертерное производство стали / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин. – Днепропетровск : РВА «Днепро-ВАЛ», 2006. – 454 с.
2. Ярошенко А. В. Оптимизация комбинированной продувки в конвертере с применением нового технического обеспечения / А. В. Ярошенко, Ю. Ф. Суханов, Ю. Н. Долгих // Сталь. – 2008. – № 8. – С. 19–21.
3. Данилин Ю. А. Освоение комбинированной продувки жидкой конвертерной ванны на Нижнетагильском металлургическом комбинате / Ю. А. Данилин, С. В. Виноградов, Н. В. Мухранов // Бюллетень «Черная металлургия». – 2010. – № 4. – С. 27–29.
4. Смоктий В. В. Комбинированные процессы выплавки стали в конвертерах / В. В. Смоктий, В. В. Лапицкий, Э. С. Белокуров. – Киев : Техника, 1992. – 163 с.
5. Rymarchyk N. Combustion lances in basic oxygen furnace (BOF) operations / N. Rymarchyk // Steelmaking conference proceedings. – 1998. – P. 445–449.
6. Комбинированная продувка металла с подачей нейтрального газа через днище конвертера / Я. А. Шнееров, С. З. Афонин, В. В. Смоктий и др. // Сталь. – 1985. – № 11. – С. 16–21.
7. Арсентьев П. П. Конвертерный процесс с комбинированным дутьем / П. П. Арсентьев, В. В. Яковлев, С. В. Комаров. – Москва : Металлургия, 1991. – 176 с.
8. Kishmoto Y. Development and prospect of combined blowing converter in Japan / Y. Kishmoto, N. Saito // Tetsu-to-hagane Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. – 2014. – Vol. 100, No. 4. – P. 445–455.
9. О неотложных задачах развития черной металлургии как главной базовой отрасли экономики Украины / Г. Г. Ефименко, В. П. Самарай, В. Н. Нещадим и др. // Металл и литье Украины. – 2010. – № 5. – С. 3–9.
10. Система комбинированной продувки жидкой конвертерной ванны на Нижнетагильском металлургическом комбинате / Ю. А. Данилин, С. В. Виноградов, Н. В. Мухранов, В. Герберт // Бюллетень «Черная металлургия». – 2008. – № 6. – С. 51–53.
11. Хефкен Э. Применение комбинированной продувки в кислородно-конвертерных цехах заводов фирмы Тиссен / Э. Хефкен, Х. Д. Пармксен, Р. А. Вебер // Черные металлы. – 1983. – № 4. – С. 4–8.
12. Меркер Э. Э. Эффективность кислородно-конвертерных процессов производства стали с дожиганием оксида углерода в отходящих газах // Э. Э. Меркер, Г. А. Карпенко // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2000. – № 4. – С. 12–14.
13. Чернятевич А. Г. Высокотемпературное моделирование кислородно-конвертерного процесса / А. Г. Чернятевич // Известия вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 12. – С. 16–18.
14. Сущенко А. В. Исследование процесса дожигания конвертерных газов с использованием динамической математической модели / А. В. Сущенко, А. С. Безчерев // Вісник Приазовського державного техн. ун-ту. – 2007. – № 17. – С. 61–65.
15. Чернятевич А. Г. Разработка наконечников двухконтурных фурм для кислородных конвертеров / А. Г. Чернятевич, Е. В. Протопопов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1995. – № 12. – С. 13–17.
16. О повышении эффективности дожигания отходящих газов в полости конвертера / Е. В. Протопопов, А. Г. Чернятевич, Е. Л. Мастеровенко, С. В. Юдин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 3. – С. 30–35.

REFERENCES

1. Boichenko, B. M., Ohotskii, V. B., Harlashin, P. S. (2006). Konverternoe proizvodstvo stali [Converter steel production]. Dnepropetrovsk : RVA "Dnepro-VAL" [in Russian].
2. Yaroshenko, A. V., Suhanov, Yu. F., Dolgih Yu. N. (2008). Optimizaciya kombinirovannoy produvki v convertere s primeneniem novogo tehniceskogo obespecheniy [Optimization of combined blowing in the converter with the use of new hardware]. Steel, Vol. 2, 30–40 [in Russian].
3. Danilin, Yu. A., Vinogradov, S. V., Mukhranov, N. V. (2010). Osvoeniye kombinirovannoy produvki zhidkoj konverternoy vannы na Nizhnetagil'skom metallurgicheskom kombinatе [Mastering the combined purging of a liquid converter bath at the Nizhny Tagil Metallurgical Combine]. Bulletin "Ferrous metallurgy", Vol. 2, 27–29 [in Russian].
4. Smoktiy, V. V., Lapitskiy, V. V., Belokurov, E. S. (1992). Kombinirovannyye protsessы vyplavki stali v konverterakh [Combined processes of steel smelting in converters]. Kyiv : Engineering [in Russian].
5. Rymarchyk, N. (1998) Combustion lances in basic oxygen furnace (BOF) operations. Steelmaking conference proceedings, 445–449.
6. Shneyerov, Ya.A., Afonin, S. Z., Smoktiy, V. V. et al. (1985). Kombinirovannaya produvka metalla s podachey neytral'nogo gaza cherez dnishche konvertera [Combined purging of the metal with the supply of neutral gas through the bottom of the converter]. Steel, Vol. 11, 16–21 [in Russian].

7. Arsent'yev, P. P., Yakovlev, V. V., Komarov, S. V. (1991). Konvertorny protsess s kombinirovannym dut'yem [Converter process with combined blowing]. Moscow: Metallurgy [in Russian].
8. Kishimoto, Y., Saito, N. (2014). Development and prospect of combined blowing converter in Japan. *Tetsu-to-hagane Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, Vol. 100, 4, 16–21.
9. Yefimenko, G. G., Samaray, V. P., Neshchadim, V. N. et. al. (2010). O neotlozhnykh zadachakh razvitiya chernoy metallurgii kak glavnoy bazovoy otrasli ekonomiki Ukrainy [On the urgent tasks of the development of ferrous metallurgy as the main basic branch of the economy of Ukraine]. *Metal and casting of Ukraine*, Vol. 5, 3–9 [in Russian].
10. Danilin, Yu. A., Vinogradov, S. V., Mukhranov, N. V., Gerbert V. (2008). Sistema kombinirovannoy produvki zhidkoy konverternoy vanny na Nizhnetagil'skom metallurgicheskom kombinatе [System for combined purging of a liquid converter bath at the Nizhny Tagil Metallurgical Combine]. *Bulletin "Ferrous metallurgy"*, Vol. 6, 51–53 [in Russian].
11. Khefken, E., Parmksen, Kh. D., Veber, R. A (1983). Primeneniye kombinirovannoy produvki v kislородno-konvertornykh tsekhakh zavodov firmy Tissen [The use of combined blowdown in oxygen-converter plants of Thyssen]. *Ferrous metals*, Vol. 4, 4–8 [in Russian].
12. Merker, E. E. (2000). Effektivnost kislородno-konvertornykh processov proizvodstva stali s dozhiganiem oksida ugleroda v othodnykh gazakh [Efficiency of oxygen-converter processes of steel production with afterburning of carbon monoxide in waste gases]. *Proceedings of high schools. Ferrous metallurgy*, Vol. 4, 12–14 [in Russian].
13. Cherniatevich, A. G. (1991). Vysokotemperaturnoe modelirovaniye kislородno-konvertornykh processov [High-temperature modeling of the oxygen-converter process]. *Proceedings of high schools. Ferrous metallurgy*, Vol. 12, 16–18 [in Russian].
14. Sushchenko, A. V., Bezcherev A. S. Issledovaniye protsesa dozhiganiya konvertornykh gazov s ispol'zovaniyem dinamicheskoy matematicheskoy modeli [Investigation of the process of afterburning of converter gases using a dynamic mathematical model]. *Bulletin of the Priazov State Engineering University*, Vol. 17, 61–65 [in Russian].
15. Cherniatevich, A. G., Protopopov, E. V. (1995). Razrabotka nakonechnikov dvuhkonturnykh furn dly kislородnykh konvertorov [Development of tips for double-circuit lances for oxygen converters]. *Proceedings of high schools. Ferrous metallurgy*, Vol. 12, 13–17 [in Russian].
16. Protopopov, E. V., Cherniatevich, A. G., Masterovenko, Ye. L. (1999). O pavishenii effektivnosti dozhiganiya othodnykh gazov v polosti konvertera [On increasing the efficiency of afterburning of waste gases in the converter cavity]. *Proceedings of high schools. Ferrous metallurgy*, Vol. 3, 30–35 [in Russian].