

УДК 669. 244.66:669.184.235.083.133

А. Г. Чернятевич, Л. С. Молчанов, П. О. Юшкевич, В. В. Вакульчук

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОДУВКИ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ  
КИСЛОРОДОМ И НЕЙТРАЛЬНЫМ ГАЗОМ***Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины*

Целью работы является разработка новой технологии комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом, позволяющей достичь существенного ресурсо- и энергосберегающего эффекта. В основе предлагаемой технологической схемы комбинированной продувки лежит использование новой конструкции трехъярусной фурмы и системы подвода к ней двух регулируемых потоков кислорода. Имеется возможность полной замены кислорода на азот в определенные периоды плавки, что позволяет существенно расширить технологические возможности комбинированной продувки конвертерной ванны. Разработка конструкции трехъярусной фурмы, которая устраняет недостатки двухъярусных дутьевых устройств, проведена с использованием высокотемпературного моделирования. Обработка полученных в ходе проведенных плавки материалов позволила получить новую информацию об особенностях физико-химических процессов, развивающихся в ходе продувки конвертерной ванны с дожиганием отходящих газов. Установлены особенности воздействия кислородных струй на процессы удаления углерода, марганца, кремния и фосфора из расплава. На основе данных высокотемпературного моделирования продувки конвертерной ванны, созданной методики расчета основных конструктивных параметров и опыта разработки промышленных конструкций многоярусных фурм разработаны и предложены к промышленному освоению трехъярусная фурма новой конструкции и технология комбинированной продувки кислородом и нейтральным газом ванны для 160-т конвертеров ПАО «АМКР». Практическая реализация представленных решений обеспечит повышение технологических и технико-экономических показателей плавки по сравнению с использованием известных разработок в данной области.

**Ключевые слова:** кислородный конвертер, комбинированная продувка, трехъярусные фурмы, разделение потоков дутья, конструкция, технология

**Состояние вопроса.** В настоящее время до 70 % всего производимого в мире железуглеродистого полупродукта выплавляется кислородно-конвертерным способом. Технологический маршрут ресурсо- и энергосберегающего конвертерного производства качественного железуглеродистого полупродукта, применяемый зарубежными металлургами перед внепечной обработкой стали (рис.1), включает следующие этапы [1,2]:

I. Глубокой десульфурации чугуна (до уровня  $\leq 0,005$  % [S]) в заливочных ковшах перед кислородно-конвертерной плавкой с применением мелкозернистых реагентов-десульфураторов (известь, плавиковый шпат, магний или смеси последнего с известью), которые в

случае использования ( $\text{CaO}+\text{CaF}_2$ ) присаживаются на поверхность ванны с механическим перемешиванием импеллером (способ KR) или вдуваются вглубь расплава в потоке несущего азота через погружную фурму по вариантам моноинжекции ( $\text{Mg}$ ) и коинжекции ( $\text{MgO}+\text{CaO}$ ).

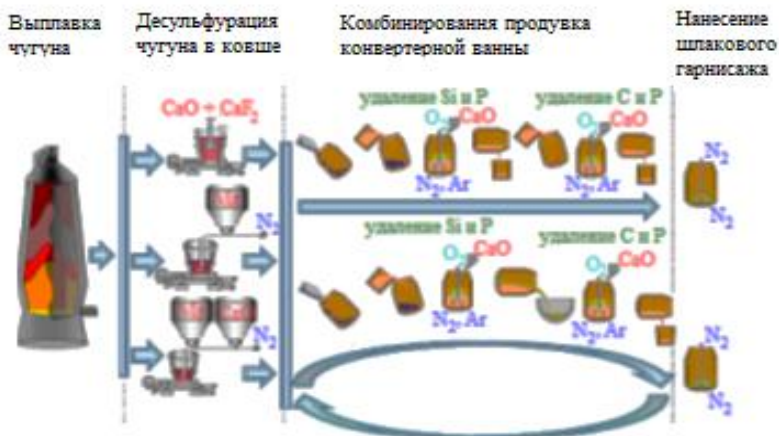


Рисунок 1 – Современный технологический маршрут ресурсо- и энергосберегающего конвертерного производства качественного железуглеродистого полупродукта.

II. Комбинированной продувки рафинированного по сере чугуна кислородом сверху и нейтральным перемешивающим газом ( $\text{N}_2, \text{Ar}$ ) через днище в двух или одном конвертерах с разделением плавки на два периода. При использовании двух конвертеров в первом периоде продувки осуществляется преимущественное совместное удаление кремния и фосфора с последующим выпуском металла из конвертера в ковш и заливкой в следующий конвертер, где во втором периоде по малошлаковой технологии осуществляется обезуглероживание и дальнейшая дефосфорация расплава с обеспечением требуемой температуры последнего перед выпуском в сталеразливочный ковш. В случае использования одного конвертера после реализации первого периода продувки по удалению кремния и фосфора осуществляется промежуточное скачивание шлака, а затем по той же малошлаковой технологии обеспечивается во втором периоде обезуглероживание ванны с достижением по окончании продувки заданного состава и температуры металла.

III. Формирования высокостойкого шлакового гарнисажа на футеровке конвертера путем раздува азотными струями через верхнюю фурму подготовленного конечного шлака с повышенным содержанием оксида магния. Оставшийся жидкий шлак, переведенный в неактивное

состояние, эффективно утилизируется в процессе обескремнивания и дефосфорации при следующей заливке чугуна в конвертер.

Указанные этапы конвертерного производства железуглеродистого полупродукта частично применяются на ряде предприятий металлургического комплекса Украины (ПАО «Алчевский металлургический комбинат», ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат») и России (ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат») [3-5]. Однако закупленные и освоённые в рамках технического перевооружения зарубежная технология комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом и конструкции кислородных фурм с классическим многосопловым наконечником не решили такие проблемы современного конвертерного процесса, как ухудшение теплового баланса плавки при пониженном содержании кремния в чугуне, недостаточная эффективность шлакообразования и дефосфорации расплава при использовании шлаков с повышенным содержанием оксида магния, интенсивное заметалливание технологического оборудования (ствола кислородной фурмы, горловины конвертера и экранной поверхности камина), пониженный выход железуглеродистого полупродукта [6].

В настоящее время, в характерных для большинства конвертерных цехов Украины условиях, когда в ходе рабочей кампании конвертера существенно колеблются исходные параметры начала плавки (температура футеровки и размеры рабочего пространства агрегата, качество заваленного металлического лома, температура и состав заливаемого чугуна), а верхняя и комбинированная продувка ванны осуществляется с принятым расходом кислорода через обычную многосопловую фурму, не всегда удается обеспечить:

- ускоренное растворение присаженной извести и магниезальных шлакообразующих материалов в отсутствие добавок плавикового шпата с формированием в начальный период продувки жидкоподвижного окислительного шлака с надлежащей основностью и содержанием оксида магния для опережающего окисления фосфора по сравнению с углеродом в расплаве;

- спокойный без выбросов и выносов характер продувки конвертерной ванны в режиме «заглубленных» кислородных струй при расположении уровня вспененного шлака выше среза наконечника фурмы на протяжении преобладающей части времени операции;

- более эффективное дожигание СО до СО<sub>2</sub> в полости конвертера для улучшения теплового баланса плавки с целью переработки повышенного количества железорудного сырья (окатышей, агломерата) из-за дефицита подготовленного металлического лома;

- предотвращение интенсивного заметалливания ствола кислородной фурмы, горловины конвертера и экранной поверхности камина;
- более интенсивное перемешивание конвертерной ванны на окончательной стадии продувки, минимальное содержание кислорода в конечном железоуглеродистом ( $\leq 0,08$  % С) полупродукте при оптимальном содержании оксидов железа в шлаке.

**Предпосылки совершенствования технологии и задачи исследований.** Актуальными задачами являются разработка и освоение в технологическом маршруте производства железоуглеродистого полупродукта (рис.1) новой технологии комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом с частичным дожиганием отходящих газов в рабочем пространстве агрегата, лишенной отмеченных недостатков и позволяющей достичь существенного ресурсо- и энергосберегающего эффекта.

С момента пуска и по сегодняшний день в конвертерном цехе металлургического комбината «Криворожсталь», а ныне ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (ПАО «АМКР»), имеющем в своем составе 6 конвертеров, были опробованы в опытно-промышленном масштабе и освоены в постоянной промышленной эксплуатации ряд прогрессивных технических решений, касающихся конструкций кислородных фурм, технологий продувки конвертерной ванны и продления стойкости футеровки конвертеров.

В свое время значительным достижением в разработке конструкции кислородной фурмы и совершенствовании технологии верхней продувки конвертерной ванны явилось применение на 130-т конвертерах двухъярусной фурмы [7,8], что позволило интенсифицировать процесс продувки, улучшить тепловой баланс плавки за счет дожигания монооксида углерода отходящих газов и увеличить тем самым долю перерабатываемого металлолома. Однако, в случае расхода кислорода на дожигание CO до CO<sub>2</sub> в пределах 10-35 % от общего на продувку, проявилось такое отрицательное последствие использования двухъярусных фурм как ускоренный локальный износ верхней цилиндрической и конической части футеровки конвертера. Этот недостаток применения двухъярусных фурм сохранился и при отработке отечественной технологии комбинированной продувки ванны 160-т конвертеров кислородом сверху и нейтральным газом перемешивающим газом (N<sub>2</sub>, Ar) через днище [9,10].

На смену освоенных в конвертерном цехе технологии и оборудования факельного торкретирования смолодоломитовой футеровки 130-т конвертеров в вертикальном положении [11] с 2007 г. был внедрен новый ресурсо- и энергосберегающий метод продления срока службы 160-т конвертеров ПАО «АМКР» с использованием вращающейся газоохлаждаемой токрет-фурмы [12], обеспечивающий стойкость

периклазоуглеродистой футеровки до 4 тыс. плавков благодаря нанесению шлакового гарнисажа на футеровку путем газовой или газопорошковой ( $N_2$ +необожженный доломит) раздувки конечного шлака с оптимальным содержанием 4-6 % MgO.

В последние годы с целью повышения эффективности работы 160-т конвертеров по малошлаковой технологии [13] с промежуточным скачиванием первичного низкоосновного шлака на опытно-промышленной кампании плавков исследована технология верхней продувки ванны через двухъярусную фурму [14] с так называемым разделенным кислородным потоком при интенсивности подачи кислорода на дожигание отходящих газов 3-5 % от общей. В результате, как и в зарубежных исследованиях [15,16], удалось достичь предотвращения локального разрушения футеровки конвертера и интенсивного заметалливания ствола фурмы и горловины агрегата.

В настоящее время в конвертерном цехе ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» предварительная десульфурация чугуна перед конвертерной плавкой не применяется. В будущем запланировано строительство современных установок десульфурации чугуна в заливочных ковшах путем вдувания диспергированного магния или смеси магния с флюидизированной известью. Выплавка железоуглеродистого полупродукта в 160-т конвертерах предусматривает максимальное удаление фосфора и серы непосредственно при продувке ванны. В качестве штатной конструкции наконечника кислородной фурмы используется литой 5-ти сопловый [17] производства ООО «Константиновский завод металлургического оборудования». При этом обеспечивается верхняя продувка конвертерной ванны кислородом с расходом 380-390  $м^3/мин$  через сопла Лавалья критического диаметра ( $d_{кр}$ ) 30 мм, расположенные в литом сопловом блоке под углом 20 град. к вертикальной оси фурмы. При диаметре наружной трубы фурмы 219 мм реализован периферийный подвод охлаждающей воды к наконечнику с расходом 80-100  $м^3/час$ .

Обескремнивание конвертерной ванны с наводкой жидкоподвижного основного шлака, содержащего 4-6 % оксида магния, осуществляется в первые 4-6 мин продувки при начальном положении фурмы 1,9-2,3 м путем присадки смеси доломитизированной и обычной извести в соотношении 3:1 без добавок плавикового шпата. Дальнейшая продувка ванны с рабочим положением фурмы 1,0-1,2 м в период интенсивного окисления углерода зачастую сопровождается «сворачиванием» шлака, ухудшением удаления вредных примесей, усилением выноса капель металла и шлака с образованием металлошлаковой настыви на стволе кислородной фурмы и горловине конвертера. Требуемые значения температуры металла на выпуске и содержания в нем фосфора и серы обеспечиваются в основном за счет соответствующих додувок и передувки

ванны ( $[C] = 0,04-0,06 \%$ ), что сопровождается повышением окисленности металла и шлака, снижением выхода жидкого железуглеродистого полупродукта.

Эксплуатация штатной кислородной фурмы в конвертерном цехе характеризуется:

- низкой стойкостью наконечников (в среднем 83 плавки) и высокими расходами наружной трубы фурмы Ш219Ч7 мм (примерно 2600 м/год) из-за повреждения при обрезке кислородной трубкой металлошлаковых настывлей;

- высокими среднемесячными простоями на ремонт и замену фурм, удаление металлошлаковых настывлей со ствола фурмы и горловины конвертера. Удаление настывлей с горловины конвертера с помощью совка, закрепленного на завалочном кране, зачастую сопровождается повреждением футеровки верхней конической части рабочего пространства агрегата.

Внепечная десульфурация стали и непрерывная разливка последней проводится в ограниченном масштабе, поскольку эксплуатируется только одна установка ковш-печь в паре с МНЛЗ, хотя разворачивается строительство новых.

На основе выявленных недостатков комбинированной продувки [6,9,10], приобретенного опыта работы с применением двухъярусных кислородных [9,10,14] и гарнисажных [12] фурм, предлагается в рамках технической модернизации конвертерного цеха реализовать следующую ресурсо – и энергосберегающую технологическую схему конвертерного производства качественного железуглеродистого полупродукта (рис. 2). В данном случае на первом этапе продувки осуществляется преимущественное удаление Si и P с промежуточным скачиванием шлака. На втором этапе продувки обеспечивается повышение температуры ванны и удаление до требуемых концентраций C и P. После выпуска Fe-C полупродукта из конвертера производится раздувка предварительно подготовленного шлака с нанесением шлакового гарнисажа на футеровку конвертера. Оставшийся шлак используется в последующей плавке.

В основе реализации технологической схемы (рис.2) лежит использование для комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом новой конструкции трехъярусной фурмы [6] и системы подвода к ней двух регулируемых потоков кислорода с возможностью их полной замены на азот в нужные периоды операции (рис.3), что позволяет существенно расширить технологические возможности комбинированной продувки конвертерной ванны (табл.1).

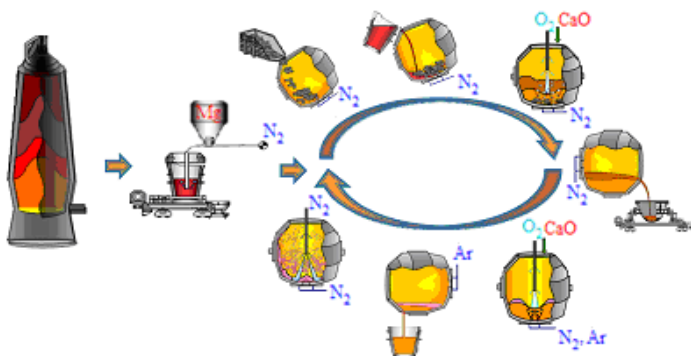


Рисунок 2 – Предлагаемая технологическая схема конвертерного производства железуглеродистого полупродукта в условиях ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог»: 1-загрузка лома; 2-залывка чугуна; 3-обескремнивание и дефосфорация; 4-присадка шлакообразующих; 5-промежуточное скачивание шлака; 6-обезуглероживание ванны; 7-выпуск металла; 8-нанесение шлакового гарнисажа (проставить на рис. 2 этапы 1-8, изобразить трехъярусную фурму только на конвертерах, где ведется продувка ванны на этапах 3 и 6 ).

Таблица 1. Задачи и пути их решения в направлении повышения ресурсо- и энергосберегающей эффективности комбинированной продувки конвертерной ванны

Поставленная задача	Способы решения задачи
1. Увеличение числа управляющих воздействий на ход продувки	Применение трехъярусной кислородной фурмы и организация продувки конвертерной ванны группами сверх- и звуковых кислородных и нейтральных газовых струй
2. Ускорение процесса шлакообразования без добавок плавикового шпата, интенсификация удаления фосфора при высоком содержании углерода, снижение содержания азота и водорода в железуглеродистом расплаве в ходе продувки	Увеличение количества реакционных зон воздействия сверх- и звуковых кислородных струй на поверхность ванны с оптимальным распределением подаваемого кислорода между металлической, шлаковой и газовой фазами полости конвертера и формированием вспененной шлакометаллической эмульсии, устойчивой большую часть времени продувки

3. Улучшение теплового баланса конвертерной плавки	Повышение эффективности дожигания во вспененном шлаке «свищевого» потока $\text{CO}$ , выходящего из основной реакционной зоны взаимодействия сверхзвуковых кислородных струй с ванной, путем формирования встречно направленной двойной завесы звуковых кислородных струй
4. Предотвращение интенсивного заматалливания ствола фурмы, горловины конвертера и камина	Подавление интенсивного выноса капель металла и шлака в направлении ствола фурмы и горловины конвертера за счет создания над основной реакционной зоной двойной завесы звуковых кислородных, а при необходимости азотных струй
5. Предотвращение локального износа футеровки верхней части конвертера	Подавление агрессивного воздействия факелов дожигания $\text{CO}$ до $\text{CO}_2$ и перекисленного шлака на футеровку локализацией дожигания в пределах околосурменного «свищевого» потока отходящих из основной реакционной зоны газов
6. Управление вспениванием шлака и предотвращение выбросов	Осаживание чрезмерно вспененного шлака и подавление выбросов посредством кратковременной подачи азотных струй во вспененную шлакометаллическую эмульсию
7. Снижение окисленности металла и шлака на окончательном этапе продувки	Для выплавки стали среднеуглеродистых марок продувку оканчивают при содержании 0,12-0,15 % углерода в металле. Для выплавки низкоуглеродистых сталей на окончательной стадии продувки при содержании углерода в металле на уровне менее 0,12% переходят на «жесткое» кислородное дутье через сопла Лавала с подачей азота через цилиндрические сопла с минимальным расходом, чтобы избежать «запечатывания» сопел брызгами металла и шлака

Для разработки конструкции трехъярусной фурмы (рис.3,б-г), предусматривающей устранение недостатков двухъярусных дутьевых устройств, было необходимо:

- с использованием высокотемпературного моделирования приобрести достоверную информацию об особенностях физико-химических явлений в ходе продувки конвертерной ванны с дожиганием отходящих газов через двух- и трехъярусную фурмы;



- на основе данных высокотемпературного моделирования и опыта разработки промышленных конструкций двухконтурных [18,19] и двухъярусных фурм [10,14] спроектировать трехъярусную фурму и предложить режим комбинированной продувки конвертерной ванны с ее использованием.

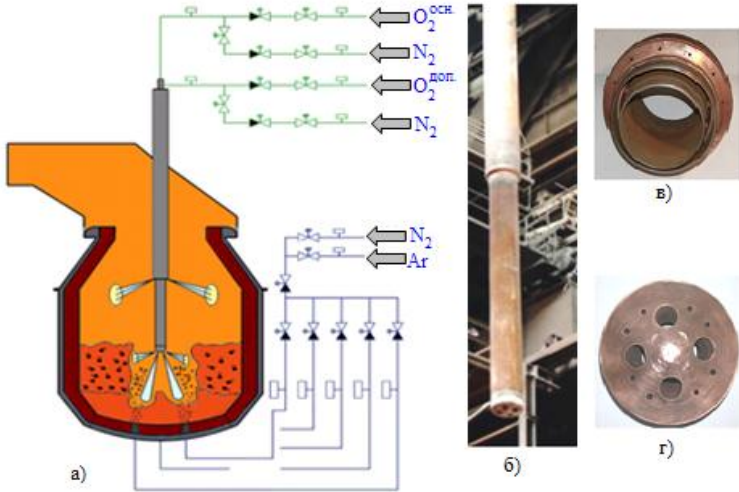


Рисунок 3 – Предлагаемая схема оснащения 160-т конвертеров регулируемым подводом технологических газов к верхней трехъярусной фурме и донным дутьевым устройствам (а), фото фурмы (б), верхнего соплового блока (в) и нижнего двухрядного наконечника (г)

К настоящему времени выявлены основные физико-химические закономерности поведения реакционной зоны воздействия кислородных струй на конвертерную ванну в ходе верхней продувки с использованием многосопловых фурм [18, 20-22], в том числе двухконтурных [18,22], параметры изменения формы и размеров образуемых кратеров, а также особенности брызгообразования и выхода на поверхность ванны газообразных продуктов окисления углерода. Однако полностью отсутствует информация о реальных физико-химических явлениях, сопровождающих верхнюю продувку конвертерной ванны группами сверх- и звуковых кислородных струй, формируемых соплами Лавала и цилиндрическими двух- и трехъярусными фурм, что не позволяет осознанно подойти к разработке оптимальных конструкций многоярусных фурменных устройств и способов продувки, обеспечивающих:

- улучшение теплового баланса конвертерной плавки за счет дожигания  $\text{CO}$  до  $\text{CO}_2$  в полости конвертера с предотвращением

повышенного локального износа футеровки верхней цилиндрической и конусной частей конвертера;

- снижение интенсивности заматывания технологического оборудования (ствола фурмы, горловины конвертера и экранной поверхности камина).

#### Установка и методика высокотемпературного моделирования.

Исследования проводили на смонтированной установке, включающей 60-кг конвертер (рис.4,а), 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 теплотерь достигается применением слоя каолиновой ваты и листового асбеста, уложенных между кожухом и футеровкой конвертера. Обжиг и разогрев футеровки конвертера осуществлялся газовой горелкой. Отвод образующихся дымовых газов в ходе разогрева футеровки, так и продувки конвертерной ванны производится через металлошланговый рукав, соединенный с отсасывающим вентилятором и дымовой трубой.

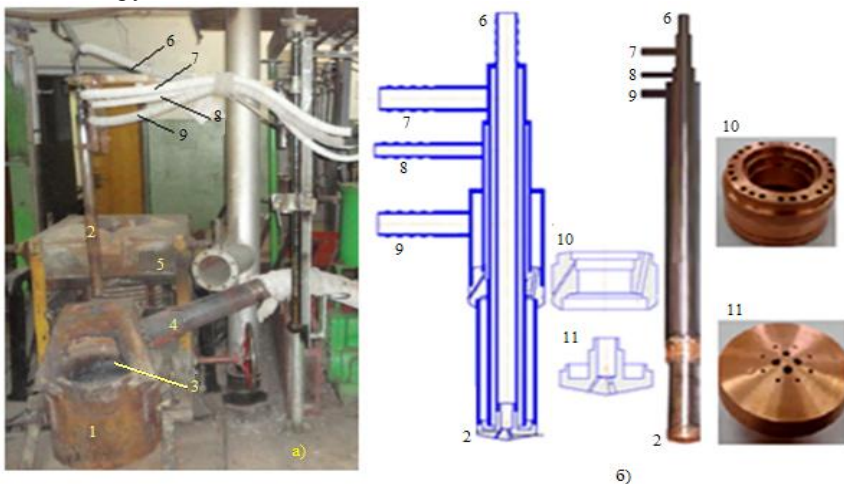


Рисунок 4 – Вид лабораторного конвертера (а) и трехъярусной кислородной фурмы (б): 1-конвертер; 2- фурма; 3-смотровое окно; 4-металлошланговый рукав для отвода конвертерных газов; 5-тигель 160–кг индукционной печи; 6,8-патрубки подвода основного и дополнительного кислорода соответственно; 7,9-патрубки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

Однорядные медные наконечники двухъярусных кислородных фурм выполнены с условием [22] создания группой сверхзвуковых кислородных струй, истекающих из четырех сопел Лавалья, обособленных

(фурма №1\*) и объединенной (фурма №2\*) реакционных зон интенсивного выхода потока СО на поверхность ванны. Для дожигания монооксида углерода звуковыми кислородными струями верхний медный сопловый блок снабжен 8-ю цилиндрическими соплами, расположенными под наклоном  $45^{\circ}$  к вертикали в первом варианте конструкции фурмы (№1\*) и  $30^{\circ}$  – во втором (№2\*).

Для верхней продувки конвертерной ванны были использованы двух- и трехъярусные водоохлаждаемые кислородные фурмы (табл.2). Двухрядный наконечник трехъярусной фурмы спроектирован так, чтобы с помощью четырех основных сверхзвуковых кислородных струй, подаваемых через сопла Лавалья внутреннего ряда, сформировать общую реакционную зону 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  $\text{CO}_2$  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.

Таблица 2 – Конструктивные параметры многоярусных фурм

Параметры	Вид фурмы		
	Двухъярусная		Трехъярусная
	№1*	№2*	
Наконечник			
Число сопел Лавалья / цилиндрических, шт.	4/-	4/-	4/8
Угол наклона к вертикали фурмы, град сопел Лавалья ( $\beta_1$ ) / цилиндрических ( $\beta_2$ )	15/-	12/-	12/30
Критический ( $d_{кр}$ ) / выходной ( $d_{вых}$ ) диаметр сопла Лавалья, мм	1,7/2,5	1,7/2,5	1,7/2,5
Диаметр цилиндрических сопел ( $d_{ц}$ ), мм	-	-	1,0
Верхний сопловый блок			
Число цилиндрических сопел, шт.	8	8	8
Угол наклона к вертикали ( $\beta_3$ ), град	45	30	30
Диаметр сопел, мм	1,0	1,0	1,0
Расстояние верхнего соплового блока от торца наконечника ( $H_я$ ), мм	105	105	105

В ходе экспериментов независимо регулируемый расход основного ( $Q_{O_2}^{осн}$ ) и дополнительного ( $Q_{O_2}^{доп}$ ) кислорода изменялся в пределах 0,12-0,25 и 0,011-0,13  $nm^3/мин$  или 2,0-3,3 и 0,18-1,65  $nm^3/т·мин$  соответственно через группы сопел Лаваля и цилиндрических. В данном случае интенсивность подачи кислорода на дожигание отходящих газов составляла 5,2-35,0 % от общей на продувку конвертерной ванны. Высоту фурмы над уровнем ванны в спокойном состоянии изменяли в пределах 20-50 калибров (диаметров критического сечения сопла Лаваля).

Жидкий низкомарганцовистый чугун, имеющий химический состав 4,05-4,50 % С, 0,49-0,90 % Si, 0,03-0,08 % Mn, 0,022-0,050 % S и 0,048-0,058 % P и температуру 1600-1650 °С, готовили в кислородном 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 многоярусной фурмы на заданной высоте) перед началом продувки.

Порядок продувки чугуна кислородом через многоярусные фурмы 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.

#### **Основные результаты высокотемпературного моделирования.**

Обработка полученных в ходе проведенных плавки материалов позволила получить новую информацию об особенностях физико-химических процессов, развивающихся в ходе продувки конвертерной ванны с дожиганием отходящих газов с использованием двух- и трехъярусной фурм (табл.2).

В начальный период продувки (до 20-30 % времени операции), при неизменных значениях расходов основного и дополнительного кислорода и высоты фурмы над ванной после устойчивого «зажигания» плавки в условиях глубокого проникновения сверхзвуковых кислородных струй в расплав чугуна, осуществляется наведение основного окислительного жидкоподвижного шлака за счет присадки необходимого количества извести и плавикового шпата (рис.5). При этом формируется реакционная зона воздействия кислородных струй на конвертерную ванну, состоящая из первичной ( $I_{р.з.}$ ) и вторичной ( $II_{р.з.}$ ) реакционных зон [23,24]. В пределах первичной реакционной зоны в результате тотального сжигания вовлеченных в кислородные струи объемов чугуна получает преимущественное развитие процесс окисления железа



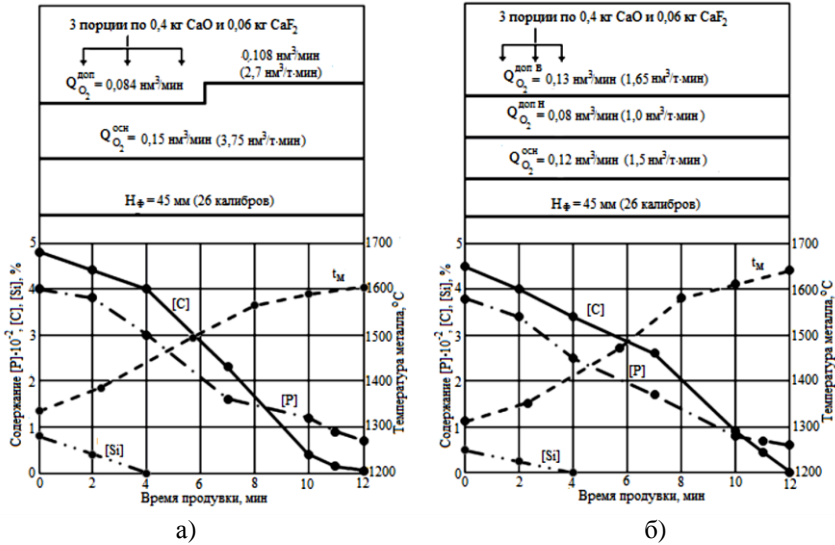
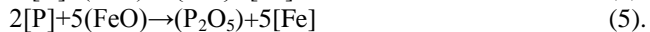


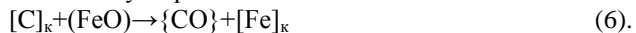
Рисунок 5 – Изменение химического состава и температуры металла по ходу плавки с использованием двухъярусной №2\* (а) и трехъярусной (б) фурм при выбранных параметрах дутья и присадок шлакообразующих материалов

Преимущественно образующиеся в  $I_{p.з.}$  оксиды железа поступают во вторичную реакционную зону ( $II_{p.з.}$ ), где реагируют непосредственно с примесями металла по реакциям:



В начальный период продувки во вторичной реакционной зоне ( $II_{p.з.}$ ), в соответствии с более благоприятными термодинамическими условиями, развивается полное окисление кремния, частичное марганца и фосфора, в результате чего образующиеся продукты реакций в виде железомарганцевых силикатов и неиспользованной части оксидов железа всплывают на поверхность ванны и взаимодействуют с присадками кусковой извести и плавикового шпата.

С интенсификацией окисления углерода из пределов реакционной зоны усиливается поток крупных и мелких брызг металла, направленных в шлак, а образующиеся в результате дробления металлические корольки (к) подвергаются в шлаке обезуглероживанию



При этом мелкие пузырьки CO накапливаются в шлаке с формированием вспененной шлакометаллической эмульсии.

На границе раздела шлак-металл и в объеме вспененной шлакометаллической эмульсии получает преимущественное развитие окисление фосфора по реакции



С началом периода интенсивного обезуглероживания ванны и размещения уровня вспененной шлакометаллической эмульсии вблизи торца наконечника двух- и трехъярусных фурм продувка сопровождается выходом монооксида углерода из реакционной зоны на поверхность ванны в форме своеобразных «свищей», которые образуются в момент разрушения всплывающих с определенной частотой макропузырей CO. В этом случае формирование факелов дожигания CO до CO<sub>2</sub> происходит только на стороне «свища», то есть в процессе дожигания принимают участие только звуковые струи дополнительного кислорода, ориентированные в направлении «свища», остальные же струи внедряются во вспененный шлак и взаимодействуют с последним (рис.6 и 7).

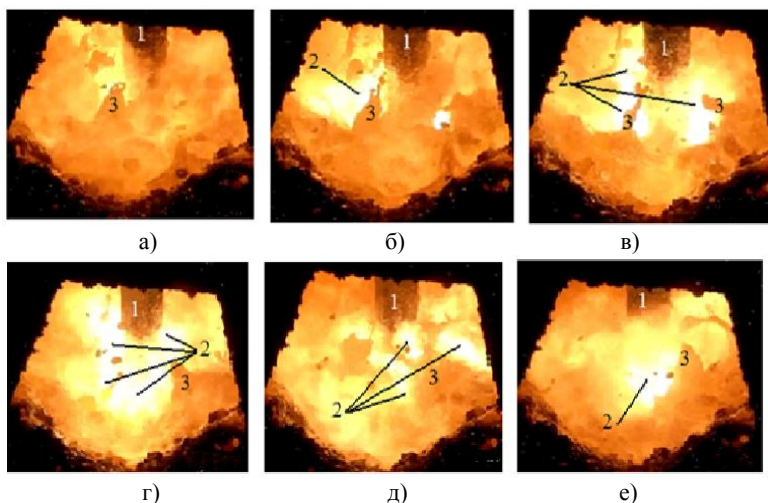


Рисунок 6. Картина начального периода продувки конвертерной ванны через двухъярусную фурму (№2\*): 1- фурма; 2- факела дожигания; 3- всплески шлака

В условиях перекрытия шлакометаллической эмульсией верхнего соплового блока фурм (рис.8) зарождение в пределах вторичных реакционных зон объемов CO, последующее увеличение и всплывание образуемых макропузырей, частичное дожигание в них CO до CO<sub>2</sub>, сопровождается первоначальным увеличением высоты вспененного слоя шлака в околофурменной зоне с последующим его снижением после выхода и разрушения макропузыря на поверхности шлака.

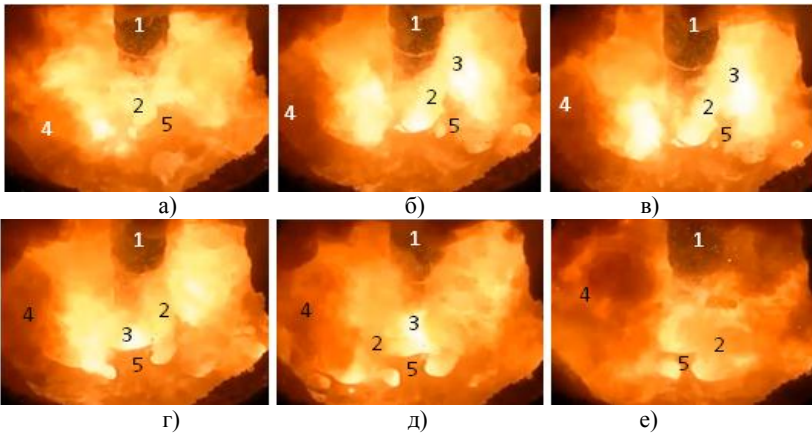


Рисунок 7. Картина продувки конвертерной ванны с расположением уровня вспененной шлакометаллической эмульсии ниже торца наконечника фурмы: 1- трехъярусная фурма; 2- реакционная зона взаимодействия кислородных струй, истекающих из двухрядного наконечника, с расплавом чугуна; 3- факелы дожигания  $\text{CO}$  до  $\text{CO}_2$ ; 4- выходящий поток бурого дыма; 5- всплески шлакометаллической фазы

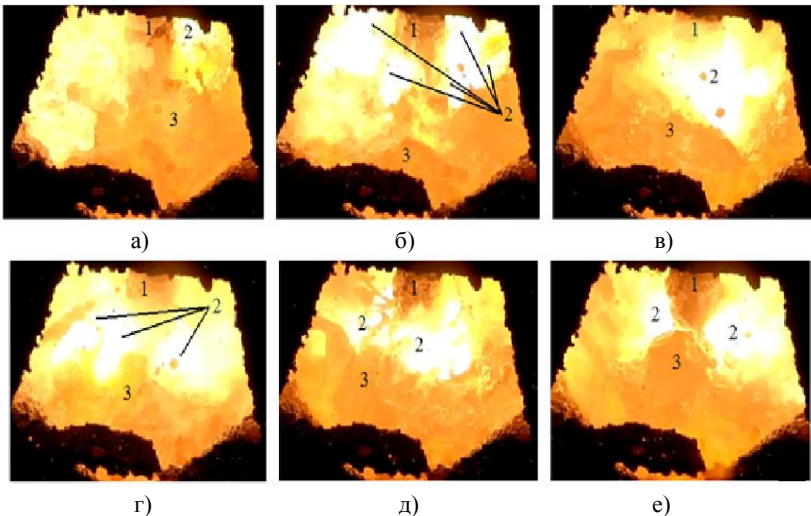


Рисунок 8 – Картина продувки конвертерной ванны через трехъярусную фурму расположением вспененного шлака на уровне верхних цилиндрических сопел: 1- фурма; 2- факел дожигания; 3- всплески шлака.

Высокотемпературные газообразные продукты реакции дожигания  
 $\{\text{CO}\} + \text{S} \{\text{O}_2\} = \{\text{CO}_2\}$  (8),

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»,  
 Сборник научных трудов ИЧМ. – 2018. - Вып.32*

передают тепло окружающей макропузырь оболочке шлакометаллической эмульсии, которая в перегретом до более высокой температуры состоянии выносится на поверхность ванны, принимая участие в процессе передачи тепла от дожигаания через шлак к металлической ванне. На протяжении основного периода продувки до так называемых «переходных» концентраций углерода (0,9-1,1 %) реакция обезуглероживания преимущественно протекает в пределах реакционной зоны и на нее расходуется практически весь основной кислород, который вдувается через сопла Лаваля наконечника фурмы. С повышением скорости обезуглероживания и соответственно с увеличением объема монооксида углерода, который выделяется из пределов реакционной зоны, происходит увеличение размеров макропузырей и частоты их появления на поверхности ванны (рис.9).

При равной скорости обезуглероживания ванны эффективность дожигаания  $\text{CO}$  до  $\text{CO}_2$  увеличивается в случае использования для продувки конвертерной ванны двухъярусной (№2\*) и трехъярусной фурм, поскольку их конструкции из-за размещения сопел Лаваля в наконечнике под углом  $12^\circ$  к вертикали, обеспечивает формирование мощного «свищевого» потока  $\text{CO}$ , выходящего из пределов общей реакционной зоны осесимметрично вдоль ствола фурмы. С понижением концентрации углерода ниже «переходных» значений подвод кислорода превышает подвод углерода на обезуглероживание в реакционной зоне.

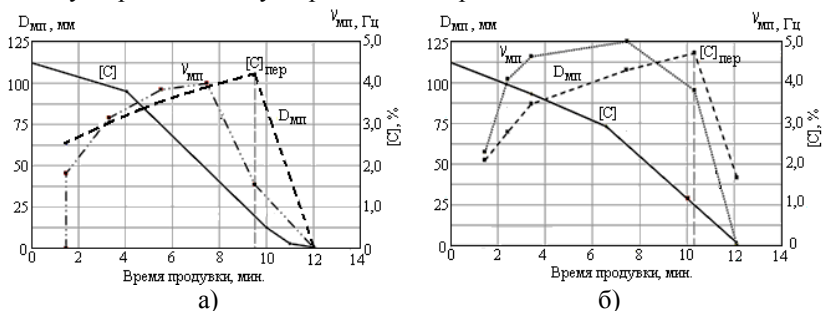


Рисунок 9 – Изменение содержания углерода, диаметра макропузырей, частоты их появления на поверхности ванны в процессе продувки через двухъярусную (а) и трехъярусную (б) фурмы

Окисление углерода в реакционной зоне с выделением из нее монооксида углерода постепенно ослабевает и начинает интенсифицироваться процесс обезуглероживания в объеме металлической ванны на всплывающих пузырях  $\text{CO}$  и в местах их зарождения на футеровке конвертера за счет кислорода, поступающего из зоны продувки. В заключительный период продувки (рис. 10) после падения факела над горловиной конвертера с понижением содержания



углерода в ванне ниже 0,08-0,15 % скорость обезуглероживания 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 железоуглеродистого полупродукта, но одновременно интенсифицирует процесс дефосфорации.

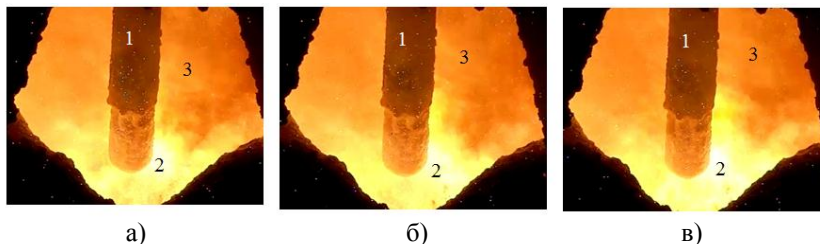


Рисунок 10. Картина заключительного периода продувки конвертерной ванны через двухъярусную фурму: 1- фурма ((№2<sup>\*</sup>); 2- факела дожигания; 3- выход бурого дыма

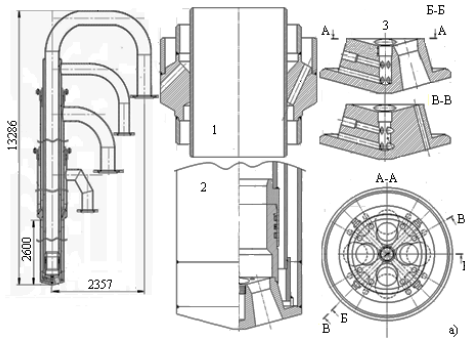
Как известно, для ускорения удаления фосфора при высоком содержании углерода в конвертерной ванне, а также предотвращения образования металлошлаковой настыви на стволе обычной кислородной фурмы необходимо добиваться возможно более раннего вспенивания шлака и возможно большей продолжительности продувки с наличием вспененной шлакометаллической эмульсии, приближающейся к горловине конвертера, не допуская при этом возникновения выбросов.

При таких условиях продувки в наших экспериментах на обеих конструкциях двухъярусных фурм, после извлечения из конвертера, наблюдались преимущественно шлаковые настыви протяженностью 230-250 мм от торца наконечника (рис.11, а), которые в процессе охлаждения самопроизвольно удалялись в результате растрескивания. В то же время при малошлаковой продувке в режиме «жесткого» воздействия сверхзвуковых кислородных струй на ванну предотвратить вынос мелких капель металла и шлака на ствол фурмы и избежать образования настывей на обеих фурмах не удалось (рис.11, б,в).

Обычно ниже верхнего яруса сопел на стволе фурмы, как и в производственных условиях [15,16], формировались в основном металлические настыви (рис.12, в), удаление которых требовало значительных затрат времени для возврата фурмы в работу.



Рисунок 11 – Вид настывей на стволах двухъярусных фурм (№1,а; №2,б) и (№2,в): 1-шлаковая настывь; 2-металлическая настывь.



Параметры продувки конвертерной ванны	И + ИД 2 - 3т		И + ИД 4 - 5т	
	Расход шлакообразующих	$Q_{O_2}^{оск} = 400 \text{ нм}^3/\text{мин}$		$Q_{O_2}^{оск} = 380 \text{ нм}^3/\text{мин}$
Расход $Q_{O_2}^{доп}, Q_{N_2}^{доп}$	$Q_{O_2}^{доп} = 20 \text{ нм}^3/\text{мин}$		$Q_{O_2}^{доп} = 40 \text{ нм}^3/\text{мин}$	
Высота фурмы	3,0 - 2,5 м		1,1 - 1,0 м	
Расход $N_2, Ar$	$Q_{N_2}^H = 12 \text{ нм}^3/\text{мин}$		$Q_{Ar}^H = 16 \text{ нм}^3/\text{мин}$	
Период шлакообразования	0 - 6		7 - 19	
Период обезуглероживания	0 - 6		7 - 19	
Период доводки	0 - 6		19 - 21	

Продолжительность продувки, мин. б)

Рисунок 12– Общий вид трехъярусной кислородной фурмы (а), дугевой и шлаковый режим (б) комбинированной продувки ванны 160-т конвертеров ПАО «АМКР»: 1- верхний сопловой блок; 2- наконечник; 3- сопловой блок двухрядного наконечника; И - известь; ИД – известь доломитизированная

В результате проведенных исследований установлено, что с использованием трехъярусной повышение эффективности дожигания отходящих газов с предотвращением локального износа футеровки, интенсивного заматалливания фурмы и горловины конвертера достигается в результате:

- создания группой сверхзвуковых кислородных струй заглубленной в металлическом расплаве реакционной зоны со «свищевым» выходом из нее вдоль ствола фурмы монооксида углерода на поверхность вспененного шлака. Это обеспечивается в условиях расположения наконечника трехъярусной фурмы над уровнем металлической ванны в спокойном состоянии на высоте, равной длине ядра начальных скоростей сверхзвуковых струй с учетом соприкосновения в глубине расплава первичных реакционных зон минимального диаметра;

- организации на пути выходящего за пределы вторичной реакционной зоны «свищевого» потока СО встречно направленной двойной завесы звуковых кислородных струй с расширением в них областей со скоростью 5-12 м/с, сравнимой со скоростью перемещения фронта пламени в смеси СО-О<sub>2</sub>. При этом звуковые кислородные струи, которые истекают из цилиндрических сопел наконечника и верхнего соплового блока, необходимо направлять на внешнюю границу вторичных реакционных зон преимущественного выделения монооксида углерода на поверхность ванны, образованных в условиях глубокого внедрения в металлический расплав сверхзвуковых кислородных струй.

На основе полученных данных высокотемпературного моделирования продувки конвертерной ванны через двух- и трехъярусную фурмы [25,26], созданной методики расчета основных конструктивных параметров и опыта разработки промышленных конструкций двухконтурных [18,19] и двухъярусных фурм [10,14] для условий работы 160-т конвертеров ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» спроектирована с изготовлением рабочих чертежей трехъярусная фурма (рис.12) и предложен режим комбинированной продувки конвертерной ванны с ее использованием [27].

Трехъярусная фурма снабжена 12-ти сопловым двухрядным наконечником, в котором под углом наклона к вертикали ( $\beta_1$ ) 12<sup>0</sup> размещены по окружности во внутреннем ряду 4 сопла Лавалья ( $d_{кр} = 41$  мм), а в наружном ряду 8 цилиндрических сопел ( $d_{ц} = 9$  мм,  $\beta_2 = 30^0$ ), формирующих соответственно основные сверхзвуковые и дополнительные звуковые струи, а также верхним 8-ми сопловым блоком ( $d_{ц} = 13$  мм,  $\beta_3 = 30^0$ ), расположенным на расстоянии 2,6 м от торца наконечника, который обеспечивает при подаче дополнительного кислорода организацию второй завесы над зоной продувки из звуковых струй, предназначенных для дожигания СО отходящих газов с

одновременным снижением интенсивности заметалливания технологического оборудования.

Особенности дутьевого и шлакового режимов ведения плавки следующие:

Донную подачу нейтральных перемешивающих газов (азот, аргон) осуществляют с расходом 12-16  $\text{нм}^3/\text{мин}$  через 8 фурм типа «труба в трубе» с огнеупорной заглушкой в центральном канале, размещенных в днище конвертера по двум окружностям. В период завалки лома и заливки чугуна через днище подается азот с расходом 8  $\text{нм}^3/\text{мин}$ .

Продувка плавки кислородом на протяжении 1-2 мин после «зажигания» ведется с расходом основного кислорода 360  $\text{нм}^3/\text{мин}$  и дополнительного 60  $\text{нм}^3/\text{мин}$  при высоте трехъярусной фурмы над уровнем ванны в спокойном состоянии 3,0-2,5 м. Затем фурма плавно опускается на высоту 1,7-1,6 м и при отмеченных выше параметрах продувка ведется до окончания периода шлакообразования с полным окислением кремния, преобладающей части марганца и фосфора.

Для ускоренного наведения первичного окислительного шлака (18-23 % FeO, 1-2 % MgO, CaO/SiO<sub>2</sub>=1,9-2,1), который обладает необходимой дефосфорирующей способностью, производится присадка обычной и доломитизированной извести в соотношении 3:1 без добавок плавикового шпата с первой по седьмую минуты продувки тремя-четырьмя равными порциями общим весом 2-3 т. Температурный ход процесса регулируется присадкой 0,2-0,3 т железорудных окатышей.

После расхода 2500-2800  $\text{нм}^3$  кислорода на протяжении 6-7 мин продувки с наличием вспененной шлакометаллической эмульсии первый период плавки заканчивается промежуточным скачиванием приблизительно половины первичного шлака.

В период интенсивного обезуглероживания ванны рабочая высота фурмы над уровнем ванны в спокойном состоянии поддерживается в пределах 1,4-1,2 м, а расход основного и дополнительного кислорода составляет 360 и 60  $\text{нм}^3/\text{мин}$  соответственно при донной подаче азота 12  $\text{нм}^3/\text{мин}$ .

Производится наведение шлака с основностью 3,5-4,0 и содержанием 10-12 % MgO путем присадки порций обычной и доломитизированной извести, а при необходимости магнезиальных модификаторов.

По достижению расхода на продувку 4000-4500  $\text{нм}^3$  производится замена вдуваемого через днище азота на аргон с расходом 16  $\text{нм}^3/\text{мин}$ , подача которого сохраняется до момента повалки конвертера.

В последние 2-3 мин продувки с целью снижения окисленности металла и шлака при выплавке железуглеродистого полупродукта трехъярусная фурма опускается на высоту 1,1-1,0 м, расход основного кислорода увеличивается до 390-400  $\text{нм}^3/\text{мин}$ , а дополнительный кислород заменяется на азот с расходом 15-20  $\text{нм}^3/\text{мин}$ , позволяющим

предотвратить запечатывание верхних цилиндрических сопел брызгами металла и шлака.

С началом выпуска железоуглеродистого полупродукта из конвертера через днище подается азот с интенсивностью  $5 \text{ нм}^3/\text{мин}$ . По окончании выпуска металла с переходом на раздувку конечного шлака с нанесением шлакового гарнисажа на футеровку во избежание запечатывания донных фурм высокомагнезиальным шлаком расход азота составляет  $18 \text{ нм}^3/\text{мин}$ , а после ошлакования футеровки снижается до  $8 \text{ нм}^3/\text{мин}$ . Оставшийся конечный шлак используется в новой плавке.

**Заключение.** Освещен отечественный опыт разработки и совершенствования технологии комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом сверху через многоярусные кислородные фурмы и нейтральным перемешивающим газом (азот, аргон) через днище.

На основе данных высокотемпературного моделирования продувки конвертерной ванны, созданной методики расчета основных конструктивных параметров и опыта разработки промышленных конструкций многоярусных фурм разработаны и предложены к промышленному освоению трехъярусная фурма новой конструкции и технология комбинированной продувки кислородом и нейтральным газом ванны 160-т конвертеров ПАО «АМКР». Практическая реализация представленных решений обеспечит повышение технологических и технико-экономических показателей плавки по сравнению с использованием известных разработок в данной области.

### Библиографический список

1. *Ogava Y., Maruoka N.* Progress of hot metal treatment technology and future outlook / Y. Ogava, N. Maruoka // *Tetsu-to-hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan.*-2014.- v. 100.- № 4.- P. 434-444.
2. *Kishimoto Y., Saito N.* Development and prospect of combined blowing converter in Japan / Y. Kishimoto, N. Saito // *Tetsu-to-hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan.*-2014.- v. 100.- № 4.- P. 445-455.
3. *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.
4. *Данилин Ю.А.* Система комбинированной продувки жидкой конвертерной ванны на Нижнетагильском металлургическом комбинате / Ю.А. Данилин, С.В. Виноградов, Н.В. Мухранов, В. Герберт // *ОАО «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия».*- 2008.- №6.- С.51-53.
5. *Смирнов Л.А.* Освоение технологии комбинированной продувки в 160-т конвертерах / Л.А.Смирнов, А.А.Бабенко, Ю.А.Данилин и др. // *Сталь.* – 2010. - №5. – С.43-45.

6. *Чернятевич А.Г.* Направления совершенствования комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом / А.Г. Чернятевич // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. ИЧМ.- 2015.- Вып. 28.- С. 147-160.*
7. *Баптизманский В.И.* Работа 130-т конвертеров, оборудованных двухъярусными фурмами / В.И. Баптизманский, В.О. Куликов, А.Т. Китаев и др. // *Экспресс-информация ЦНИИ и ТЭИ ЧМ.- 1974.- серия 6.- вып.-3.- С. 1-14.*
8. *Кудрина А.П.* Служба футеровки 130-т конвертеров при продувке металла кислородом через двухъярусную фурму / А.П. Кудрина, Б.В. Никифоров, А.Т. Китаев и др. // *Огнеупоры.- 1974.-№1.- С.27-32.*
9. *Шнееров Я.А.* Комбинированная продувка металла с подачей нейтрального газа через днище конвертера / Я.А.Шнееров, С.З.Афонин, В.В.Смоктый и др. // *Сталь. – 1985. - № 11. – С. 16-21.*
10. *Чернятевич А.Г.* 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.*
11. *Кукурузняк И.С.* Факельное торкретирование футеровки 130-т конвертеров вертикальным способом / И.С. Кукурузняк, И.С. Врублевская, В.Г. Порхун, А.П. Петрунин // *Металлургическая и горнорудная промышленность.- 1989.- №3.- С. 16-17.*
12. *Чернятевич А.Г.* Разработка конструкций фурменных устройств для горячего ремонта футеровки конвертеров / А.Г. Чернятевич, Е.В. Протопопов, Е.Н. Сигарев и др. // *Теория и практика металлургии.- 2010.- № 1-2.- С. 68-73.*
13. *Старов Р.В.* Малошлаковая технология конвертерной плавки / Р.В.Старов, Н.М.Омесь, В.Г.Городец и др. // *Сталь. – 1989. - № 5. – С. 25-28.*
14. *Чернятевич А.Г.* Разработка конструкции двухъярусной фурмы и режима продувки ванны 160-т конвертеров ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» с ее использованием / А.Г. Чернятевич, Е.Н. Сигарев, И.В. Чернятевич и др. // *Теория и практика металлургии.- 2012.- № 5-6.- С. 76-85.*
15. *Rymarchyk N.* Post combustion lances in Basic Oxygen Furnace (BOF) operations / N. Rymarchyk // *Steelmaking Conference Proceedings. – 1998. – P. 445-449.*
16. *Stone R.P.* Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation / R.P. Stone, D. Neith, S. Koester et al. // *AIS Tech 2009 Proceedings. – 2009. - №1.- P.737-747.*
17. *Чернятевич А.Г.* Направления совершенствования конструкций кислородных фурм в конвертерных цехах Украины /А.Г. Чернятевич, А.В. Сущенко, В.В. Вакульчук, П.О. Юшкевич // *Бюллетень ОАО «Черметинформация». Черная металлургия.- 2015.- №3.- С. 52-65.*
18. *Чернятевич А.Г.* Разработка наконечников двухконтурных фурм для кислородных конвертеров / А.Г. Чернятевич, Е.В. Протопопов // *Изв. ВУЗов. Черная металлургия.- 1995.- № 12.- С. 13-17.*
19. *Чернятевич А.Г.* Комбинированная продувка конвертерной ванны с использованием двухконтурной фурмы / А.Г. Чернятевич, Л.А. Ганзер, Р.С. Айзатулов и др. // *Черная металлургия: Бюл. НТИ.- 1988.- № 7.- С. 48-50.*
20. *Чернятевич А.Г.* Макрокартина физических явлений в реакционной зоне кислородного конвертера при продувке многосопловыми фурмами / А.Г. Чернятевич, Е.Я. Зарвин, Ю.Н. Борисов и др. / А.Г. Чернятевич, Е.Я. Зарвин,

- Ю.Н. Борисов и др. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия.- 1977.- № 12.- С. 61-65.
21. *Чернятевич А.Г.* Некоторые вопросы распространения кислородных струй в рабочем пространстве конвертера / А.Г. Чернятевич, Б.И. Шишов // Изв. ВУЗов. Черная металлургия.- 1981.- № 1.- С. 28-32; № 3.- С. 42-45.
  22. *Чернятевич А.Г.* Экспериментальное изучение параметров реакционной зоны в условиях комбинированной продувки / А.Г. Чернятевич, Е.В. Протопопов // Изв. ВУЗов. Черная металлургия.- 1991.- № 6.- С. 17-22.
  23. *Охотский В.Б.* Модель процесса рафинирования металла при продувке его кислородом сверху / В.Б. Охотский, А.Г. Чернятевич // Изв. ВУЗов. Черная металлургия.- 1972.- № 10.- С. 61-64.
  24. *Баттизманский В.И., Охотский В.Б.* Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса: Монография.- Киев-Донецк: Вища школа. Головное изд-во, 1961.- 184 с.
  25. *Чернятевич А.Г.* Картина продувки конвертерной ванны с использованием двухъярусной кислородной фурмы /А. Г. Чернятевич, Е.Н. Сигарев, Л. С. Молчанов и др. // Бюллетень «Черная металлургия». – 2017. – №12. – С. 39–45.
  26. *Чернятевич А.Г.* Высокотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны с применением трехъярусной фурмы / А. Г. Чернятевич, Л. С. Молчанов, П. О. Юшкевич // Металл и литье Украины. – 2017. – №6-7. – С. 17–21.
  27. *Чернятевич А.Г.* Направления повышения эффективности продувки ванны 160-т конвертеров ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» / А.Г. Чернятевич, Л.С. Молчанов, П.О. Юшкевич // Теория и практика металлургии. – №3–4. – 2017. – С.66–74.

## Reference

1. *Ogava Y., Maruoka N.* Progress of hot metal treatment technology and future outlook / Y. Ogava, N. Maruoka // Tetsu-to-hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan.-2014.- v. 100.- № 4.- P. 434-444.
2. *Kishimoto Y., Saito N.* Development and prospect of combined blowing converter in Japan / Y. Kishimoto, N. Saito // Tetsu-to-hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan.-2014.- v. 100.- № 4.- P. 445-455.
3. *Yaroshenko A.V.* Optimizatsiya kombinirovannoy produvki v konvertere s primeneniem novogo tekhnicheskogo obespecheniya / A.V.Yaroshenko, YU.F.Sukhanov, YU.N. Dolgikh // Stal'. – 2008. - № 8. – S. 19-21.
4. *Danilin YU.A.* Sistema kombinirovannoy produvki zhidkoy konverternooy vannoy na Nizhnetagil'skom metallurgicheskom kombinatе / YU.A. Danilin, S.V. Vinogradov, N.V. Mukhranov, V. Gerbert // ОАО «Chermetinformatsiya». Byulleten' «Chernaya metallurgiya».- 2008.- №6.- S.51-53.
5. *Smirnov L.A.* Osvoyeniye tekhnologii kombinirovannoy produvki v 160-t konverterakh / L.A.Smirnov, A.A.Babenko, YU.A.Danilin i dr. // Stal'. – 2010. - №5. – S.43-45.
6. *Chernyatevich A.G.* Napravleniya sovershenstvovaniya kombinirovannoy produvki konverternooy vannoy kislorodom i neytral'nym gazom / A.G. Chernyatevich //

- Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii: sb. nauch. tr. ICHM.- 2015.- Vyp. 28.- S. 147-160.
7. Baptizmanskiy V.I. Rabota 130-t konverterov, oborudovannykh dvukh"yarusnymi furnami / V.I. Baptizmanskiy, V.O. Kulikov, A.T. Kitayev i dr. // Ekspres-informatsiya TSNII i TEI CHM.- 1974.- seriya 6.- vyp.-3.- S. 1-14.
  8. Kudrina A.P. Sluzhba futerovki 130-t konverterov pri produvke metalla kislorodom cherez dvukh"yarusnyuyu furnu / A.P. Kudrina, B.V. Nikiforov, A.T. Kitayev i dr. // Ogneupory.- 1974.- №1.- S.27-32.
  9. Shneyerov YA.A. Kombinirovannaya produvka metalla s podachey neytral'nogo gaza cherez dnishche konvertera / YA.A.Shneyerov, S.Z.Afonin, V.V.Smoktiy i dr. // Stal'. – 1985. - № 11. – S. 16-21.
  10. Chernyatevich A.G. Kombinirovannaya produvka s podachey neytral'nogo gaza sverkhu i cherez dnishche konvertera / A.G.Chernyatevich, R.S.Ayzatulov, L.M.Uchitel' i dr. // Stal'. – 1989. - № 5. – S.20-23.
  11. Kukuruznyak I.S. Fakel'noye torkretirovaniye futerovki 130-t konverterov vertikal'nym sposobom / I.S. Kukuruznyak, I.S. Vrublevskaya, V.G. Porkhun, A.P. Petrunin // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'-. 1989.- №3.- S. 16-17.
  12. Chernyatevich A.G. Razrabotka konstruksiy furnennykh ustroystv dlya goryachego remonta futerovki konverterov / A.G. Chernyatevich, Ye.V. Protopopov, Ye.N. Sigarev i dr. // Teoriya i praktika metallurgii.- 2010.- № 1-2.- S. 68-73.
  13. Starov R.V. Maloshlakovaya tekhnologiya konverternoy plavki / R.V.Starov, N.M.Omes', V.G.Gorobets i dr. // Stal'. – 1989. - № 5. – S. 25-28.
  14. Chernyatevich A.G. Razrabotka konstruksii dvukh"yarusnoy furny i rezhima produvki vanny 160-t konverterov PAO «ArselorMittal Krivoy Rog» s yeye ispol'zovaniyem / A.G. Chernyatevich, Ye.N. Sigarev, I.V. Chernyatevich i dr. // Teoriya i praktika metallurgii.- 2012.- № 5-6.- S. 76-85.
  15. Rymarchyk N. Post combustion lances in Basic Oxygen Furnace (BOF) operations / N. Rymarchyk // Steelmaking Conference Proceedings. – 1998. – P. 445-449.
  16. Stone R.P. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation / R.P. Stone, D. Neith, S. Koester et al. // AIS Tech 2009 Proceedings. – 2009. - №1.- P.737-747.
  17. Chernyatevich A.G. Napravleniya sovershenstvovaniya konstruksiy kislorodnykh furn v konverternykh tsekhakh Ukrainy /A.G. Chernyatevich, A.V. Sushchenko, V.V. Vakul'chuk, P.O. Yushkevich // Byulleten' OAO «Chermetinformatsiya». Chernaya metallurgiya.- 2015.- №3.- S. 52-65.
  18. Chernyatevich A.G. Razrabotka nakonechnikov dvukhkonturnykh furn dlya kislorodnykh konverterov / A.G. Chernyatevich, Ye.V. Protopopov // Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya.- 1995.- № 12.- S. 13-17.
  19. Chernyatevich A.G. Kombinirovannaya produvka konverternoy vanny s ispol'zovaniyem dvukhkonturnoy furny / A.G. Chernyatevich, L.A Ganzer, R.S. Ayzatulov i dr. // Chernaya metallurgiya: Byul. NTI.- 1988.- № 7.- S. 48-50.
  20. Chernyatevich A.G. Makrokartina fizicheskikh yaleniy v reaktsionnoy zone kislorodnogo konvertera pri produvke mnogoplovymi furnami / A.G. Chernyatevich, Ye.YA. Zarvin, YU.N. Borisov i dr. / A.G. Chernyatevich, Ye.YA. Zarvin, YU.N. Borisov i dr. // Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya.- 1977.- № 12.- S. 61-65.



21. Chernyatevich A.G. Nekotoryye voprosy rasprostraneniya kislorodnykh struy v rabochem prostranstve konvertera / A.G. Chernyatevich, B.I. Shishov // Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya.- 1981.- № 1.- S. 28-32; № 3.- S. 42-45.
22. Chernyatevich A.G. Eksperimental'noye izucheniye parametrov reaktsionnoy zony v usloviyakh kombinirovannoy produvki / A.G. Chernyatevich, Ye.V. Protopopov // Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya.- 1991.- № 6.- S. 17-22.
23. Okhotskiy V.B. Model' protsessa rafinirovaniya metalla pri produvke yego kislorodom sverkhu / V.B. Okhotskiy, A.G. Chernyatevich // Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya.- 1972.- № 10.- S. 61-64.
24. Baptizmanskii V.I., Okhotskiy V.B. Fiziko-khimicheskiye osnovy kislorodno-konverternogo protsessa: Monografiya.- Kiyev-Donetsk: Vishcha shkola. Golovnoye izd-vo, 1961.- 184 s.
25. Chernyatevich A.G. Kartina produvki konverternoy vannы s ispol'zovaniyem dvukh'yarusnoy kislorodnoy furmy / A. G. Chernyatevich, Ye.N. Sigarev, L. S. Molchanovi i dr. // Byulleten' «Chernaya metallurgiya». – 2017. – №12. – S. 39–45.
26. Chernyatevich A.G. Vysokotemperaturnoye modelirovaniye produvki konverternoy vannы s primeneniyyem trekh'yarusnoy furmy / A. G. Chernyatevich, L. S. Molchanov, P. O. Yushkevich // Metall i lit'ye Ukrainy. – 2017. – №6-7. – S. 17–21.
27. Chernyatevich A.G. Napravleniya povysheniya effektivnosti produvki vannы 160-t konverterov PAO «ArselorMittal Krivoy Rog» / A.G. Chernyatevich, L.S. Molchanov, P.O. Yushkevich // Teoriya i praktika metallurgii. – №3–4. – 2017. – S.66–74.

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

**Розробка енергоефективної технології комбінованої продувки конвертерної ванни киснем і нейтральним газом**

Метою роботи є розробка нової технології комбінованої продувки конвертерної ванни киснем і нейтральним газом, що дозволяє досягти істотного ресурсо- та енергозберігаючого ефекту. В основі запропонованої технологічної схеми комбінованої продувки лежить використання нової конструкції триярусної фурми і системи підведення до неї двох регульованих потоків кисню. Є можливість повної заміни кисню на азот в певні періоди плавки, що дозволяє істотно розширити технологічні можливості комбінованої продувки конвертерної ванни. Розробка конструкції триярусної фурми, яка усуває недоліки двоярусних дугтевих пристроїв, проведена з використанням високотемпературного моделювання. Обробка отриманих в ході проведених плавок матеріалів дозволила отримати нову інформацію про особливості фізико-хімічних процесів, що розвиваються в ході продувки конвертерної ванни з дожиганням газів, що відходять. Встановлено особливості впливу кисневих струменів на процеси видалення вуглецю, марганцю, кремнію та фосфору з розплаву. На основі даних високотемпературного моделювання продувки конвертерної ванни, створеної методики розрахунку основних конструктивних параметрів і досвіду розробки промислових конструкцій багаторусних фурм розроблено та запропоновано до промислового освоєння триярусна фурма нової конструкції і технологія

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»,  
Сборник научных трудов ИЧМ. – 2018. - Вып.32*

комбінованої продувки киснем і нейтральним газом ванни для 160-т конвертерів. Практична реалізація представлених рішень забезпечить підвищення технологічних і техніко-економічних показників плавки в порівнянні з використанням відомих розробок в даній області.

Ключові слова: кисневий конвертер, комбінована продування, триярусні фурми, поділ потоків дуття, конструкція, технологія,

*A. G. Chernyatevich, L. S. Molchanov, P. O. Yushkevich, V. V. Vakulchuk*

### **Development of energy efficient technology of combined blowing of converter bath by oxygen and neutral gases**

The aim of the work is the development of a new technology of combined purging of the converter bath with oxygen and neutral gas, which allows to achieve a significant resource and energy saving effect. The proposed technological scheme of combined purging is based on the use of a new design of a three-tiered tuyere and a system for supplying two regulated oxygen flows to it. It is possible to completely replace oxygen with nitrogen at certain periods of melting, which allows us to significantly expand the technological capabilities of the combined purge of the converter bath. The design of a three-tiered tuyere, which eliminates the disadvantages of two-tier blowing devices, was carried out using high-temperature modeling. Processing of the materials obtained in the course of the conducted melts allowed us to obtain new information about the features of the physicochemical processes developing during the flushing of the converter bath with the afterburning of the exhaust gases. The features of the effect of oxygen jets on the removal of carbon, manganese, silicon and phosphorus from the melt are established. Based on the data of high-temperature modeling of the purge of the converter bath, the established methodology for calculating the main design parameters and experience in developing industrial structures of multi-tiered tuyeres, a three-tiered tuyere of the new design and a combined bath of oxygen and neutral gas for the 160-ton converters have been developed and proposed for industrial development. The practical implementation of the presented solutions will provide an increase in the technological and technical-economic indicators of smelting in comparison with the use of well-known developments in this field.

**Keywords: oxygen converter, combined blowing, three-tiered tuyeres, blast flow separation, construction, technology**

*Статья поступила в редакцию сборника 29.10.2018 года,  
прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания  
редакционной коллегии сборника №1 от 26 декабря 2018 года)  
Рецензенты: д.т.н., проф. Е.Н.Сигарев; д.т.н, А.С.Вергун*