

МЕТАЛУРГІЯ СТАЛІ

УДК 669.184.14

Сущенко А.В.*

РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИЙ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНЫХ ФУРМ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ СОПЛОВЫМ МОДУЛЕМ

Рассмотрены особенности, технические возможности, примеры практического использования и перспективы развития конструкций кислородно-конвертерных фурм с центральным соплом (сопловым модулем).

Ключевые слова: конвертерный процесс, фурма для верхней продувки, сопловой блок, центральный сопловый модуль, технические возможности, технико-экономические показатели.

Сущенко А.В. Розвиток конструкцій киснево-конвертерних фурм з центральним сопловим модулем. Розглянуті особливості, технічні можливості, приклади практичного використання та перспективи розвитку конструкцій киснево-конвертерних фурм з центральним соплом (сопловим модулем).

Ключові слова: конвертерний процес, фурма для верхнього продування, сопловий блок, центральний сопловий модуль, технічні можливості, техніко-економічні показники.

A. V. Sushchenko. Oxygen lance design with central nozzle module development. Features, technical feasibilities, examples of practical application and prospects of development of oxygen lance designs with the central nozzle (nozzle module) are considered.

Keywords: basic oxygen process, top blown lance, nozzle unit, central nozzle module, technical feasibilities, technical and economic indexes.

Постановка проблемы. Решение главной задачи современного кислородно-конвертерного процесса - получение расплавленного металла с заданными свойствами (структура, состав, температура) при минимальных затратах материальных и энергетических ресурсов и вредных выбросах в окружающую среду неразрывно связано с оптимизацией параметров дутьевых режимов и устройств - одного из основных и наиболее универсальных управляющих воздействий на ход и технико-экономические показатели плавки. В связи с отсутствием дополнительной (донной или боковой) перемешивающей продувки ванны, возможности управления макрокинетикой плавки (посредством дутьевого режима) в подавляющем большинстве отечественных конвертерных цехов достаточно ограничены. Вместе с тем усилившиеся в последнее время тенденции в нестабильности снабжения предприятий сырьём и энергоносителями, а также необходимость развития новых технологий (с использованием первородного сырья, дожигания газов в агрегате и др.) требуют расширения указанных возможностей. Одним из основных направлений решения рассматриваемой проблемы является совершенствование существующих и разработка новых конструкций кислородных фурм и соответствующих режимов продувки конвертерной ванны.

Анализ последних исследований и публикаций. Условия эксплуатации кислородных фурм для верхней продувки расплава в сталеплавильных агрегатах являются достаточно тяжелыми, особенно в мартеновских и двухванных печах, где при рабочем положении фурменных наконечников на границе «шлак-металл» плотность теплового потока на них достигает 6 МВт/м² и более [1]. Поэтому в мартеновском производстве использовались (и используются), как правило, кислородные фурмы с центральным подводом охлаждающей воды, имеющие наиболее эффективное охлаждение медных наконечников [2]. Несмотря на более высокую интенсивность кислородной продувки и, как следствие, температуру первичной реакционной зоны, в

* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

конвертерном процессе условия работы водоохлаждаемых верхних фурм являются менее «жесткими», что связано с более высоким рабочим положением фурмы и меньшим попаданием на наконечник расплавленного металла (при условии нормальных дутьевого и шлакового режимов плавки). Поэтому, как у нас в стране, так и за рубежом, в подавляющем большинстве конвертерных цехов используются кислородные фурмы с периферийной подводкой охлаждающей воды и центральным – кислорода [3], благодаря простоте в их изготовлении и ремонте. Одним из преимуществ кислородных фурм таких конструкций является возможность использования дополнительного центрального сопла (сопел) или центрального соплового модуля, позволяющего решать различные задачи кислородно-конвертерного производства. Вместе с тем это преимущество недостаточно используется при конструировании фурм и управлении плавкой.

Целью статьи являлись анализ технических возможностей и особенностей конструкций, обобщение имеющегося опыта эксплуатации и рассмотрение перспектив развития кислородно-конвертерных фурм с периферийным подводкой охлаждающей воды и центральным соплом (сопловым модулем).

Изложение основного материала. Основные требования к конструкции кислородной фурмы и дутьевому режиму конвертерной плавки изложены в работе [4]. Влияние наличия и конструктивных особенностей центрального сопла *на стойкость медного фурменного наконечника* можно рассматривать в следующих аспектах: 1) влияние на гидродинамику течения охлаждающей воды и интенсивность охлаждения наиболее теплонапряженной центральной торцевой части головки фурмы; 2) изменение механических и термочувствительных характеристик наконечника; 3) влияние на интенсивность заматывания наконечника и фурмы в целом.

Анализ эффективности гидродинамической работы систем охлаждения наконечников кислородных фурм (с периферийной подачей воды) для верхней продувки 130-180 т и 250-400 т конвертеров, выполненный на основе результатов численного моделирования, полученных с использованием методики [5] и программного комплекса FlowVision (ООО «Тесис», РФ), показал следующее. В наконечниках фурм с упрощенной системой охлаждения (роль разделителя воды выполняет концевая часть промежуточной трубы ствола фурмы, телескопический фиксатор и т.п.) основной поток воды, не заходя в межсопловую область, перетекает из подводящего тракта в отводящий непосредственно под разделительной трубой с высокой скоростью. В остальной части головки формируется сложное течение, состоящее из трех-четырех последовательно расположенных циркуляционных контуров (вихрей); от периферийной к центральной части наконечника кинетическая энергия потока уменьшается и непосредственно в центральной межсопловой области имеет место плохо организованное, неустойчивое, несимметричное течение воды со скоростью w_0 порядка 0,5 м/с (застойная зона охладителя) [2]. При использовании специальных разделителей (распределителей), направляющих воду в центральную область головки, охлаждение последней существенно улучшается, однако, как правило, дополнительно образуются конусообразные центральные зоны (верхняя и нижняя) со слабой циркуляцией охладителя (особенно при четном числе периферийных сопел в наконечнике, когда картина течения воды в нем близка к симметричной). Для уменьшения объема указанных зон можно эффективно использовать дополнительное центральное сопло или центральную вставку («ложное» сопло, ребро жесткости и т.п.) – см. рис. 1. При этом оптимизация геометрических параметров наружной поверхности центрального сопла позволяет дополнительно улучшить организацию течения воды в головке. Применение центрального сопла (или центральной вставки) в конструкциях наконечников без профилированного разделителя воды, с точки зрения оптимизации организации гидродинамики течения охладителя, малоэффективно. Следует также отметить, что при нерациональных геометрических параметрах центрального сопла (для определенных размеров головки) наличие его может ухудшить гидродинамику течения воды в наконечнике, в частности, ослабить или «подавить» характерное продольное течение части поступающей воды через центральную межсопловую область головки с нечетным числом периферийных сопел.

При наличии центрального сопла имеет место дополнительный охлаждающий эффект от протекающего через него кислородного потока на центральную часть торца головки. В связи с тем, что коэффициент теплоотдачи к кислородному потоку (в диффузорах сопел) примерно на порядок меньше, чем к воде, эффективность кислородного охлаждения значительно меньше, чем водяного. Однако для наиболее нагретых - выходных участков сопел роль кислородного

охлаждения является значимой. Как было показано в [6], для обычных условий работы типовых фурм 160-т (350-т) конвертеров плотности тепловых потоков к воде (от торца наконечника) и к кислороду (на выходном участке сопла) составляют порядка 1,6 (1,8) МВт/м² и 0,4 (0,3) МВт/м² соответственно. С другой стороны, при работе центрального сопла в режиме перерасширения с отрывом кислородного потока от стенок диффузора, вследствие эжекции и горения в зоне отрыва запыленных СО-содержащих газов, тепловой поток на выходной участок сопла может существенно увеличиться. При использовании центрального сопла для организации истечения «умягченных» струй окислителя, дожигающих СО в непосредственной близости от торцевой поверхности наконечника, тепловая нагрузка на нее также увеличивается, что требует дополнительной интенсификации охлаждения центральной части головки фурмы.

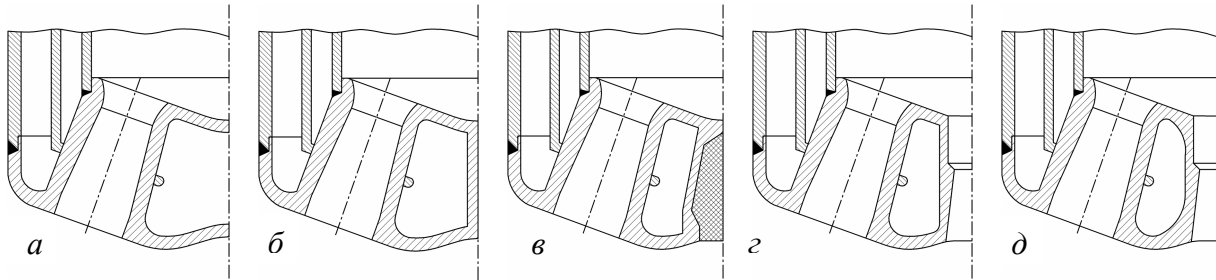


Рис. 1 - Варианты конструктивного исполнения центральной части наконечника кислородной фурмы с периферийным подводом охлаждающей воды: *а* - с вогнутой нижней тарелкой (чашей), *б* с - центральным ребром жесткости, *в* - с «ложным» соплом, *г* - с центральным соплом (ЦС), *д* - с ЦС с наружной профилированной поверхностью

Влияние центрального кислородного потока на стойкость медной фурменной головки наиболее существенно проявляется через изменение интенсивности ее заметалливания. С одной стороны, при взаимодействии центральной струи с металлической ванной имеет место лобовой удар и усиление брызгообразования, а с другой – при правильной организации одновременной продувки конвертерной ванны двумя типами струй (в т.ч. центральной «умягченной») имеет место ускорение шлакообразования и снижение интенсивности заметалливания наконечника и ствола фурмы. Кроме того, центральная струя (при ее определенной организации) может обеспечивать газодинамическую защиту торцевой части наконечника от попадания на нее перегретых и переокисленных капель металла из реакционной зоны (РЗ).

С целью увеличения механической прочности фурменной головки, в т.ч. для предотвращения выдавливания нагретой центральной части нижней тарелки под действием давления охлаждающей воды ($p_v = 0,8 - 1,5$ МПа), в некоторых конструкциях используют центральное ребро жесткости (стержень) или «ложное» сопло. Последнее заполняют огнеупорной массой и применяют также для увеличения стойкости центральной части головки при ее заметалливании. При использовании центрального сопла в головке оно может выполнять указанные функции.

Для фурменных наконечников сварной конструкции наличие центрального кислородного сопла или соплового модуля приводит к необходимости выполнения дополнительного сварного шва и уменьшения расстояний между соседними сварными швами на торцевой части головки, что увеличивает вероятность выхода ее из строя. Однако, как показывает опыт, даже при такой конструкции, при хорошей организации течения охладителя стойкость наконечников в целом может быть увеличена до приемлемого уровня. Так например, в ККЦ ОАО «МК «Азовсталь» (350 т конвертеры) счет оптимизации параметров профилированного разделителя воды листового типа была обеспечена средняя стойкость сварных фурменных головок с пятью основными и одним центральным (5п + 1ц) соплами на уровне 120 плавов, а пятисопловых наконечников (4п+1ц) - не менее 200 плавов [7].

При анализе влияния конструктивных особенностей центрального сопла **на технологические возможности и технико-экономические показатели конвертерного процесса** можно условно выделить следующие направления: 1) повышение интенсивности продувки плавки; 2) расширение возможностей управления процессом, в т.ч. динамикой фаз в агрегате (улучшение шлакообразования, снижение окисленности, улучшение качества металла, экономия металло-

шихты и др.); 3) улучшение теплового баланса плавки; 4) совершенствование технологии азотной раздувки шлака на футеровку конвертера; 5) улучшение условий контроля параметров процесса.

При повышении интенсивности продувки плавки, с целью улучшения шлакообразования, снижения интенсивности выносов металла из конвертера, уменьшения угара железа «в дым» (снижения температуры РЗ) и т.п., требуется рассредоточение дутья по поверхности ванны, что зачастую решается увеличением числа сопел в головке фурмы n_c . Для наконечников с отдельно расположенными периферийными соплами при увеличении n_c более 5 – 6 существенно ухудшается организация циркуляции охладителя в межсоловом пространстве, уменьшается расстояние между сварными швами до величины меньше допустимой (для сварной конструкции), что приводит к резкому снижению стойкости. Для решения указанной проблемы можно использовать варианты конструкций головки с блочным расположением периферийных сопел или с дополнительным центральным соплом. Так, например в ККЦ ОАО «ММК», используя опыт ОАО «МК «Азовсталь» [8], за счет применения центрального сопла в кислородной фурме с шестью периферийными тангенциальными соплами (6п + 1ц) интенсивность продувки плавки была увеличена с 1100-1250 до 1400-1550 м³/мин [9]. При этом продолжительность продувки сократилась на 18 %, улучшились процессы шлакообразования и десульфурации металла.

С целью расширения возможностей управления конвертерной плавкой в LD процессе необходимо «сбалансировать» противоречивые требования к дутьевому режиму, заключающиеся в необходимости одновременного обеспечения «жесткой» (для быстрого зажигания плавки, интенсивного перемешивания ванны и др.) и «мягкой» (для ускоренного и устойчивого шлакообразования, увеличения степени окисления углерода до CO₂ и др.) продувки ванны. Эта задача может решаться с использованием фурм для одновременной продувки ванны двумя типами струй - двухконтурных фурм с двумя типами сопел с общим или независимыми (отдельно регулируемыми) трактами подачи кислорода. Во втором варианте возможности управления плавкой дополнительно увеличиваются за счет регулирования параметров вторичного, более «мягкого» дутья, в зависимости от динамики процесса окисления углерода, состояния шлако-газо-металлической эмульсии (ШГМЭ) и др. факторов. При этом использование современных схем подачи энергоносителей (ЭН) к фурме, обеспечивающих замену O₂ на Ar (N₂), позволяет по ходу продувки плавки регулировать окислительный потенциал вторичного дутья, что особенно важно при выплавке высококачественных и низкоуглеродистых сталей. Использование центрального сопла для подачи Ar, N₂ позволяет реализовать послепродувочную «промывку» ванны инертным газом при значительно меньших его расходах и достаточной глубине проникновения в металл (см. рис. 2 а).

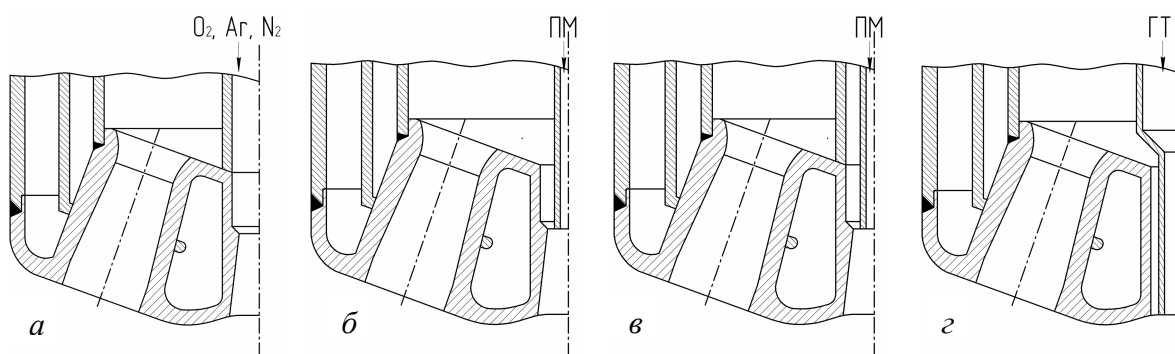


Рис. 2 - Варианты конструкций кислородных фурм многоцелевого назначения с ЦС: а – с отдельно регулируемым центральным трактом подачи ЭН, б, в - для подачи порошкообразных материалов (ПМ) с общим (б) и раздельными (в) трактами подвода кислорода, д - для подачи газообразного топлива (ГТ)

Для «умягчения» струи вторичного кислорода (ВК) центральное сопло может быть выполнено с меньшей пропускной способностью, с уменьшенным числом Маха (M_c), нетрадиционной конструкции, в т.ч. с резонаторами и дроссельными устройствами различных типов. При независимом регулировании подачи ВК с целью исключения отрыва потока в качестве

центрального можно использовать цилиндрическое или сужающееся сопло.

Как показали экспериментальные исследования на «холодной» модели и численное моделирование с использованием программного комплекса FlowVision, в зависимости от конструктивных и режимных параметров основных продувочных и центрального сопел, могут иметь место различные режимы взаимодействия центральной и периферийных струй: со сближением и раздвижением последних, с развитой эжекцией и практически без эжекции содержимого центральной струи в более мощные периферийные струи.

Для реализации технологий конвертерной плавки с вдуванием в ванну различных порошкообразных материалов (известь, руда, пыль газоочисток, уголь и др.) используются кислородные фурмы с центральным сопловым модулем (ЦСМ) типа б), в) (рис. 2).

С целью улучшения теплового баланса плавки применяются фурмы и фурмы-горелки с ЦСМ для подачи порошкообразного углеродсодержащего или газообразного топлива (рис.2). Для реализации энергосберегающей технологии дожигания отходящих газов в полости конвертера необходимо значительное снижение дальности (для предотвращения рекомбинации CO_2 в контакте с металлической ванной) и увеличение угла раскрытия струй вторичного кислорода. Указанная задача может решаться с использованием фурм с центральным соплом с установленным на входе в него дроссельным устройством или завихрителем (рис. 3). Применение последнего более рационально, т.к. позволяет создать устойчивую вихревую зону дожигания CO с увеличенной площадью взаимодействия с отходящими газами. Учитывая, что для условий LD процесса оптимальная доля вторичного кислорода для дожигания CO в ШГМЭ не превышает 15 % [10], а при отсутствии отдельно регулируемого тракта подачи ВК - 10 %, использование для этой цели ЦСМ может быть достаточно эффективным. Преимуществом фурм таких конструкций является минимизация негативного воздействия струи ВК и зоны дожигания на футеровку конвертера, простота в изготовлении и ремонте, надежность в эксплуатации, хорошая управляемость процессом шлакообразования и плавкой в целом.

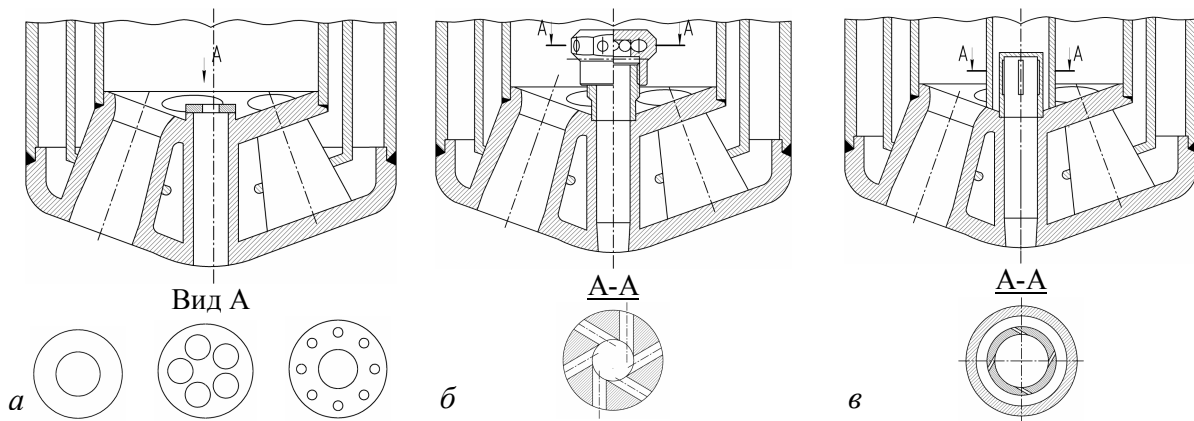


Рис. 3 - Варианты конструкций кислородных фурм с центральным сопловым модулем для интенсификации дожигания CO в полости конвертера: а - с дроссельным устройством, б - с тангенциальным завихрителем, в - с тангенциальным завихрителем щелевого типа и отдельно регулируемым трактом подачи вторичного кислорода

Так, применение кислородных фурм с центральным соплом с установленным на входе в него тангенциальным завихрителем на 350-т конвертерах ОАО "МК "Азовсталь" [11] и на 160-т конвертерах ОАО "ММК им. Ильича" [12], при доле вторичного кислорода от суммарного его количества 5 и 4 %, позволило интенсифицировать процесс дожигания CO , улучшить шлакообразование и сократить удельный расход чугуна на 6,1 и 1 - 4 кг/т стали соответственно без негативного воздействия на футеровку конвертера (рис. 4).

Для условий работы 350 т конвертеров ОАО "МК "Азовсталь" (отсутствие донного перемешивающего дутья и дополнительного регулируемого тракта подвода кислорода к фурме) были разработаны конструкция наконечника универсальной кислородной фурмы с ЦСМ и соответствующие дутьевые режимы плавки с её использованием, позволяющие поддерживать близкий к оптимальному ход процесса при различных шихтовых и производственных условиях ра-

боты агрегатов [8]. При этом используется центральное сопло специальной конструкции со съёмным тангенциальным завихрителем газового потока., что позволяет достаточно быстро и просто, на этапе установки наконечника на фурменный ствол, изменять (в зависимости от прогнозируемых условий работы цеха) модификацию (тип) фурмы и в широких пределах варьировать дутьевым режимом плавки. В условиях "холодной" по теплу шихтовки плавки используется фурма с установленным завихрителем (режим А): центральный поток ВК истекает в виде "умягчённой" вихревой струи, предназначенной для дожигания СО до СО₂ в газовой фазе и шлако-газо-металлической эмульсии конвертера в непосредственной близости от металлической ванны, а основные (периферийные) струи дутья обеспечивают достаточно "жёсткую" продувку ванны, необходимую для интенсивного перемешивания расплава. При "нормальной" (по теплу) шихтовке плавки завихритель также устанавливается, однако, дополнительно к интенсификации процесса дожигания СО функциональное предназначение ВК состоит в ускорении ассимиляции извести шлаком и поддержании требуемого уровня окисленности последнего (без периодического увеличения рабочей высоты фурмы по ходу продувки) - режим Б. Применение фурмы в режимах А и Б позволило улучшить тепловой баланс и шлаковый режим плавки; удельный расход чугуна снизился на 6,5 кг/т, металлошихты - на 5,8 кг/т, извести - на 3,8 кг/т стали; расход кислорода увеличился на 3,7 м³/т стали, что связано с организацией процесса дополнительного дожигания СО до СО₂ в рабочем пространстве конвертера. При использовании фурмы в условиях "горячей" шихтовки завихритель не устанавливается (режим В). Это позволяет существенно "умягчить" продувку за счёт снижения удельного импульса и раздвижения основных дутьевых струй при увеличении доли кислорода, истекающего из центрального сопла в виде сильно недорасширенной сверхзвуковой струи. Была обеспечена стабилизация шлакового режима, практически полностью исключены случаи раннего "свёртывания" шлака; получена экономия: металлошихты - на 9,4 кг/т, чугуна - на 2,7 кг/т, извести - на 2,1 кг/т, плавикового шпата - на 0,04 кг/т (на 11 %) и кислорода - на 1,1 м³/т стали. Средняя стойкость наконечников универсальной конструкции с ЦСМ составила ~ 180 плавков

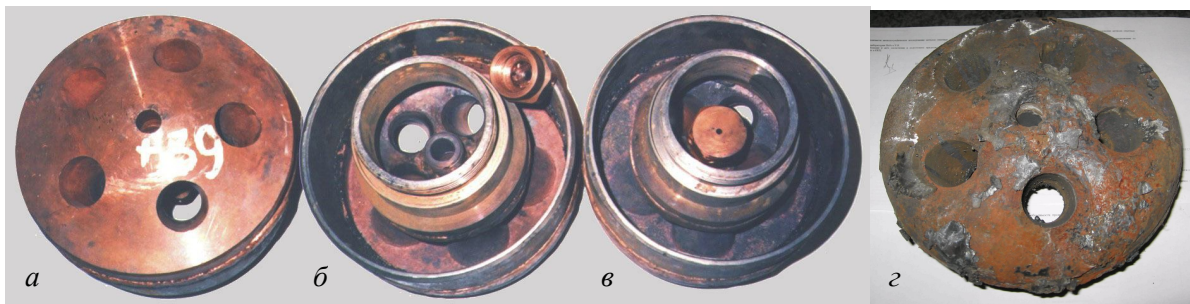


Рис. 4 - Наконечники кислородной фурмы литой конструкции с центральным сопловым модулем для интенсификации процесса дожигания отходящих газов в полости кислородного конвертера (слева на право: вид снизу; вид сверху без и с установленным тангенциальным завихрителем на входе в центральное сопло; снятый с фурмы после 441 плавки)

В последнее время наконечники конвертерных фурм с дополнительным центральным соплом получили распространение в странах дальнего зарубежья, в т.ч. для реализации энергоресурсосберегающей технологии ошлакования футеровки конвертеров методом пневматического разбрызгивания (раздувки) азотом на нее остаточного шлака после выпуска плавки. Так, например, в конвертерном цехе ВАО Steel (Китай) для раздувки шлака в 300-т конвертерах достаточно эффективно используются фурмы с 5-ти сопловыми блоками типа (4 п + 1 ц) [13].

Центральное сопло верхней продувочной фурмы рационально использовать также для контроля различных технологических параметров конвертерного процесса. При установке специальной измерительной штанги (со съёмным расходным стержнем или трубкой на конце) в ЦС или ЦСМ (рис. 5, а, б) обеспечивается более точный замер фактического положения (высоты) фурмы над уровнем металлической ванны H_{ϕ} по сравнению с другими подобными, используемыми на практике способами периодических контрольных замеров параметра H_{ϕ} : фиксация измерительного стержня (или трубки) в одном из периферийных сопел, крепление его к ство-

лу фурмы и т.п. Операция установки измерительной штанги (с фиксацией при помощи специального соединения на переходном цилиндрическом участке ЦС или в центральном отверстии тангенциального завихрителя ЦСМ) осуществляется быстрее, а операция замера – безопасно, т.к. стальной стержень не может касаться стальных элементов внутренней части фурмы, что исключает процесс «затяжки» фронта горения внутрь кислородной фурмы в случае ошибочных действий персонала цеха.

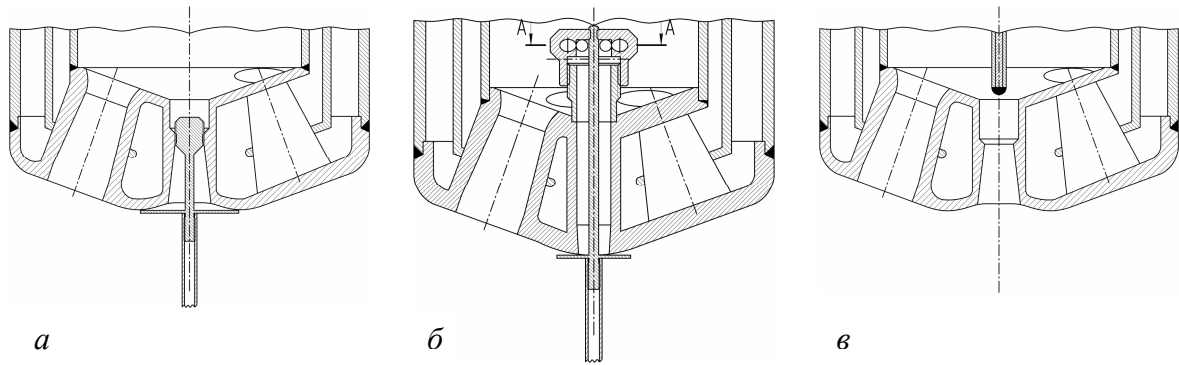


Рис. 5 - Применение центрального сопла продувочной фурмы для контроля технологических параметров процесса: *а, б* - установка измерительной штанги для определения фактического положения фурмы над уровнем металлической ванны, *в* - фурма с оптической системой (датчик, световод и защитный экран) для определения температуры РЗ и металлического расплава

На рис. 5, в приведена принципиальная схема установки в фурме с ЦС оптической системы для контроля температуры реакционной зоны и металлического расплава T_{me} . При непрерывном определении последней в процессе кислородной продувки плавки замеряется температура первичной реакционной зоны, через которую пересчитывается температура металлической ванны. Для непосредственного замера T_{me} кислородная продувка прерывается, через фурму или через ее ЦС (при наличии отдельного регулируемого тракта подвода ЭН - см. рис. 2, а) подается с малым расходом инертный (лучепрозрачный) газ, который сдувает шлак для «оголения» зеркала металла.

В дальнейшем планируется проведение экспериментальных и аналитических исследований режимов и механизмов взаимодействия сверхзвуковых периферийных струй дутья с центральной струей различного типа, истекающих из кислородной фурмы в условиях конвертерного процесса.

Выводы

1. Влияние наличия и конструктивных параметров центрального сопла (ЦС) на стойкость фурменного наконечника наиболее существенно проявляется через изменение интенсивности его заметалливания. Использование ЦС рациональной конструкции позволяет улучшить организацию охлаждения головки (при наличии в ней специального разделителя воды), увеличить ее механическую прочность, реализовать газодинамическую защиту наиболее уязвимой - центральной торцевой части наконечника от попадания брызг металла из РЗ.
2. В зависимости от конструктивных и режимных параметров основных продувочных и центрального сопел могут иметь место различные режимы взаимодействия центральной и периферийных струй: со сближением и раздвижением последних, с развитой эжекцией и практически без эжекции содержимого центральной струи в более мощные периферийные струи.
3. Применение кислородных фурм с ЦС (ЦСМ) позволяет эффективно решать ряд технологических задач конвертерного производства: повысить интенсивность продувки плавки без ухудшения организации циркуляции охлаждающей воды в межсопловом пространстве наконечника; расширить возможности управления плавкой, особенно в LD процессе, за счет организации одновременной продувки ванны двумя типами струй; реализовать послепродувочную «про-

мывку» ванны инертным газом через верхнюю фурму при значительно меньших его расходах и достаточной глубине проникновения в металл; улучшить тепловой баланс конвертерной плавки, в т.ч. за счет эффективного дожигания CO – содержащих газов центральной вихревой струей кислорода без негативного воздействия на футеровку конвертера; улучшить технико-экономические показатели выплавки стали в условиях нестабильных параметров шихты и производства путем оперативного изменения конструкции соплового блока головки фурмы и др.

Список использованных источников:

1. Баптизманский В.И. Фурмы для продувки мартеновской ванны и их работа / В.И. Баптизманский, А.Г. Величко, А.В. Шибко // Бюл. НТИ. Черная металлургия. – 1990. – № 5 – С. 24–33.
2. Сущенко А.В. Анализ эффективности систем охлаждения наконечников фурм кислородных конвертеров. Сообщение 1, 2 / А.В. Сущенко, А.П. Балаба // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 1 – С. 6-9; 2009. – № 3 – С. 9–12.
3. Баптизманский В.И. Дутьевые устройства кислородных конвертеров / В.И. Баптизманский, А.Г. Величко, А.В. Шибко // Бюл. НТИ. Черная металлургия. – 1987. – № 6 – С. 2–15.
4. Сущенко А.В. К вопросу об оптимизации дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров / А.В. Сущенко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 3 – С. 21–26.
5. Сущенко А.В. Применение программного комплекса FlowVision для решения задач оптимизации систем охлаждения дутьевых устройств металлургических агрегатов / А.В. Сущенко, А.П. Балаба // Инженерные системы – 2009. – М.: РУДН, 2009. – Том 1. – С. 3–7.
6. Сущенко А.В. Моделирование тепловой работы наконечников кислородных фурм для верхней продувки конвертеров / А.В. Сущенко, А.П. Балаба // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 3. – С. 53–58.
7. Повышение стойкости наконечников фурм для 350-т конвертеров / А.В. Сущенко, А.А. Курдюков, И.Д. Буга и др. // Сталь. – 1996. - № 5. – С. 14–17.
8. Кислородная фурма для продувки конвертерных плавок в условиях нестабильных параметров шихты и производства / А.В. Сущенко, В.И. Ганошенко, А.Б. Ковура и др. // Труды шестого конгресса сталеплавильщиков. – М.: АО «Черметинформация», 2001. – С. 104–107.
9. Результаты опробования продувки металла в кислородном конвертере семисопловыми фурмами с центральным соплом / Р.С. Тахаутдинов, А.А. Степанова, В.Ф. Коротких и др. // Совершенствование технологии в ОАО «ММК» (Сб. тр. ЦЛМК ОАО «ММК»). – Магнитогорск: Дом печати, 2005. – Вып. 9. – С. 32–40.
10. Сущенко А.В. Моделирование процесса дожигания монооксида углерода в кислородном конвертере при различных вариантах подвода дутья / А.В. Сущенко, А.С. Безчерев А.С. // Вісник ПДТУ. – Вип. 14. – 2004. – С. 44–48.
11. Разработка и промышленное опробование кислородных фурм для одновременной продувки расплава струями двух типов / А.В. Сущенко, А.А. Курдюков, И.Д. Буга [и др.] // Бюл. НТИЭИ. Черная металлургия. - 1998. – № 11 - 12. - С. 44–45.
12. Разработка и внедрение кислородной фурмы для интенсификации дожигания отходящих газов в 160-т конвертерах мариупольского металлургического комбината им. Ильича / А.В. Сущенко, А.А. Ларионов, В.В. Климанчук и др. // Труды IX-ого конгресса сталеплавильщиков. - Москва: ОАО «Черметинформация», 2007. – С.130–134.
13. Jian C. Slag Splashing for BAO Steel's 300 Metric Ton BOF and Crystallographic Structure of its Slag. / C. Jian, Y. Wenyuan, Z. Congjie // Iron and Steelmaker. - 2000, July. – P. 39–41.

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ЛГТУ»

Статья поступила 24.12.2010