

С. И. Семькин, Т. С. Голуб, С. А. Дудченко, В. В. Вакульчук

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ
ПРОДУВКИ МЕТАЛЛА В КОНВЕРТЕРЕ ЧЕРЕЗ ВЕРХНЮЮ
КИСЛОРОДНУЮ ФУРМУ С КОЛЬЦЕВЫМ ЩЕЛЕВЫМ СОПЛОМ**

Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины

Метою роботи є дослідження на фізичній моделі кисневого конвертера взаємодії кисневої струменя, що витікає з коаксіального щілинного сопла, з заліззовуглецевих розплавом. При холодному моделюванні продувки через коаксіальне щілинне сопло верхньої кисневої фурми було встановлено, що закінчується з нього струмінь газу по осі поширення володіє великим у порівнянні з циліндричним соплом динамічним напором, в результаті чого глибше проникає в рідину. Порівняльний аналіз відео матеріалів, отриманих при проведенні високотемпературних плавок, виявив газодинамічні відмінності в характері взаємодії струменя з поверхнею розплаву, особливо на початку продувки плавки, коли ще не сформована шлакова емульсія. Зіставлення результатів високотемпературного моделювання взаємодії струменю кисню, що витікає з коаксіального щілинного сопла, з металевим розплавом при зіставленні з роботою чотирехсоплового наконечника показало, що спостерігається більш раннє запалення плавки, активне засвоєння вапна і візуально більш жорсткий характер продувки з формуванням меншої кількості шлаку, ніж на порівняльних плавках. Підтверджено отримані на етапі «холодного» моделювання висновки про більш високій динамічний натиск і глибоке проникнення в розплав струменя при застосуванні селевого наконечника фурми. Виявлено, що застосування досвідченого наконечника сприяє більшому розігріву ванни і зниження рівня виділення пилу.

Ключові слова: конвертер, високотемпературне моделювання, верхня продування, коаксіальне щілинне сопло, пиловиділення

Постановка проблемы. В мировой практике сталеплавильного производства кислородно-конвертерный процесс является переделом, наиболее полно соответствующим требованиям по повышению производительности, снижению энергоемкости и улучшению качества металлопродукции [1-2]. Он обладает наибольшей приспособляемостью к изменяющимся требованиям мирового рынка и условиям сырьевой базы в виду легкости и быстроты внедрения любых изменений, касающихся как конструкции отдельных частей агрегата, так и всего процесса в целом. Кислородно-конвертерный процесс, благодаря его гибкости, позволяет ему оставаться наиболее конкурентоспособным способом производства жидкого железоуглеродистого продукта, однако он не достиг предела в вопросах усовершенствования как технологии, так и конструкции элементов используемого оборудования. Особенно это касается основного управляющего инструмента в кислородно-конвертерном процессе-продувочной фурмы и режимов ее работы.

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

На предварительном этапе при холодном моделировании продувки через коаксиальный щелевой сопловой наконечник верхней кислородной фурмы было установлено, что истекающая из него струя газа по оси распространения обладает большим по сравнению с цилиндрическим соплом динамическим напором, в результате чего глубже проникает в жидкость.

Целью работы является исследование на физической модели кислородного конвертера взаимодействия истекающей из коаксиального щелевого сопла кислородной струи с железоуглеродистым расплавом.

Методика проведения высокотемпературных экспериментов. Опыты по оценке взаимодействия струи, истекающей из коаксиального щелевого сопла, были проведены в условиях лабораторного участка ДГТУ на 100-кг модели кислородного конвертера [3-4], изготовленного в масштабе 1:30 к промышленному 160-т конвертеру. В модель (ковш) заливали порядка 60 кг расплава чугуна при температуре 1360-1400⁰С, после чего фурму опускали на рабочую высоту и осуществляли продувку металлического расплава технически чистым кислородом (чистотой порядка 99,5%) до «падения» факела. Одновременно с подачей кислорода запускали приборы регистрации технологических параметров: температуры отходящих дымовых газов (с помощью хромель-копелевой термопары) и уровня светимости подфурменной зоны (с помощью пирометра), характеризующих величину разогрева сталеплавильной ванны. Ввод шлакообразующих осуществлялся по образцу технологии, используемой на промышленном конвертере, в три присадки: 1,2 кг извести и 0,06 кг шпата на первой, третьей и пятой минутах продувки.

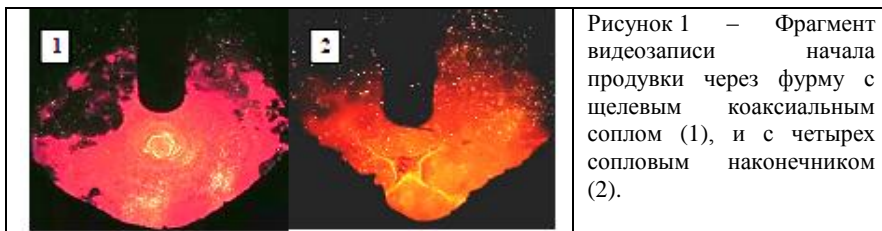
Опытные и сравнительные плавки были проведены в сопоставимых технологических условиях продувки с применением чугуна состава:

Вариант продувки	Содержание в чугуне элемента, %масс.				
	углерод	кремний	марганец	сера	фосфор
опытная	3,95	0,7	0,17	0,021	0,090
сравнительная	4,0	0,9	0,15	0,018	0,086

Продувки осуществляли при использовании наконечника фурмы со щелевым коаксиальным соплом, образованным внутренним диаметром вставки 6 мм и наружным диаметром прутка - 5 мм. Для сравнения были проведены продувки с использованием четырех соплового наконечника (диаметр сопла 1,7 мм, угол наклона 14 град.). Сечение щелевого сопла и сравнительного наконечника выбраны равновеликими, исходя из подобию промышленному конвертеру с 4-х сопловым наконечником с диаметром сопел Лавала 40 мм каждое.

В течение всей продувки производилась видеозапись подфурменной реакционной области ванны через смотровое окно модели с помощью скоростной видеокамеры EXILEN F-1 и регистрация уровня пыли в отходящих газах датчиком пыли ДВП-02.

Обсуждение результатов. Сопоставительный анализ видео материалов, полученных при проведении плавок, выявил газодинамические различия в характере взаимодействия струи с поверхностью расплава, особенно явно заметные в начале продувки плавки, когда еще не сформирована шлаковая эмульсия. На рис.1 приведены характерные фото (эпизоды видеозаписи), иллюстрирующие формирование зон взаимодействия при продувке через опытный и сравнительный наконечники.



Так, на этапе до зажигания плавки в случае применения щелевого коаксиального сопла в подфурменной области формируются характерные образования в виде кольцевой зоны внедрения струи в железоуглеродистый расплав. Подобный характер внедрения газовой струи, истекающей из опытного наконечника, был выявлен при проведении холодного моделирования с использованием жидкой среды. В случае применения четырех соплового наконечника было отмечено формирование четырех зон внедрения от каждой из струй, что характерно для работы данного типа наконечников [5-6]. Также было отмечено, что при применении щелевого коаксиального соплового наконечника зажигание продувки наступало быстрее по сравнению с продувкой через четырех сопловый наконечник и составляло порядка 8-15 секунд против 12-25 секунд в случае сравнительной продувки. Это, по-видимому, связано с большим уровнем динамического напора, создаваемого струей, истекающей из опытного соплового наконечника. При этом продувка, в случае применения щелевого опытного соплового наконечника, по визуальной оценке, отличалась большим периодом времени без «задымления» факела.

Выявлено, что применение опытного типа наконечника способствовало более раннему формированию активного шлакового покрова, поскольку присаживаемая порция извести усваивалась быстрее, чем в случае применения четырех соплового наконечника, и составляла порядка 40-50 секунд, против 50-60 секунд, требуемых для ассимиляции аналогичной порции присаживаемой извести при применении четырех соплового наконечника.

Анализ изменения показателей: светимости подфурменной области (рис.2) и температуры отходящего дыма (рис.3), характеризующих разогрев ванны, показал, что продувка с применением коаксиального щелевого сопла по сравнению с использованием четырех соплового наконечника уже с первых минут отличалась значительным разогревом расплава.

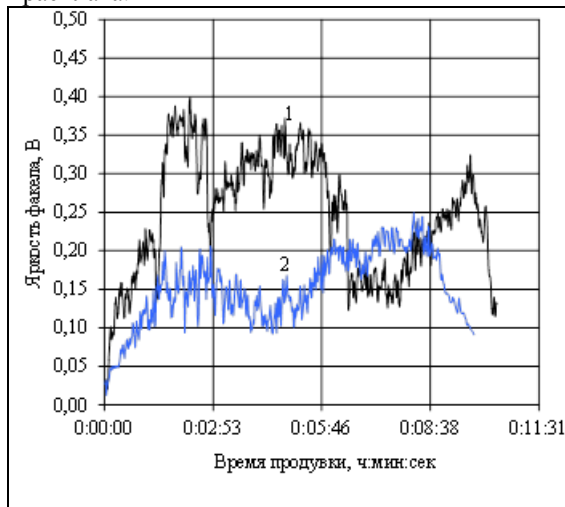


Рисунок 2 – Изменение уровня зарегистрированной пирометром светимости подфурменной области по ходу продувок: опытной – (1) и сравнительной –(2) плавки

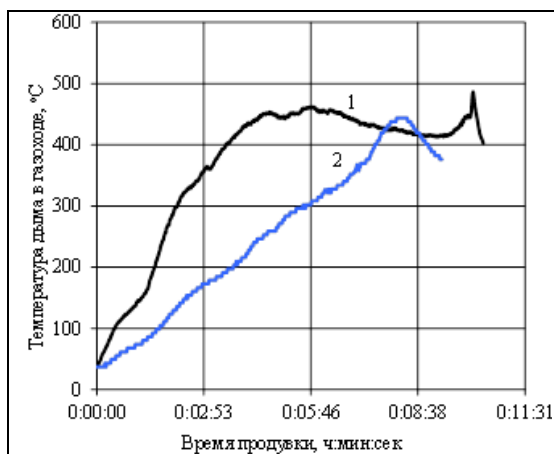


Рисунок 3 – Изменение уровня температуры отходящих газов, зарегистрированной термопарой по ходу продувок: опытной (1) и сравнительной (2) плавки

Так, в начальный период продувки температура отходящего газа в опытном варианте была больше на 190-200⁰С, а в основной период продувки на 130-150⁰С. На сравнительных плавках достичь температурного уровня опытных плавки получалось только в период

максимальной интенсивности окисления углерода, характеризующийся, как известно, значительным увеличением температуры отходящих газов [1]. Зарегистрированный значительный разогрев ванны, в случае применения щелевого коаксиального сопла, вероятно, является одной из причин более быстрого по сравнению с вариантом применения четырех соплового наконечника усвоения присаженных порций извести. Второй причиной может быть выявленное при «холодном» моделировании активное дробление поверхности жидкой среды, которое при продувке жидкого металла приводит к формированию окислов железа на поверхности ванны, вступающих в реакцию с известью, что способствует ее усвоению и шлакообразованию. Однако следует отметить, что, несмотря на активное и раннее шлакообразование, на опытных плавках было сформировано меньшее, чем на сравнительных плавках, количество шлака и наблюдался более низкий уровень подъема ванны в аналогичные периоды продувки. Это связано с отмеченным визуально более «жестким» характером продувки на опытных плавках, отличающимся более высоким динамическим напором струи с более глубоким уровнем проникновения ее в жидкость, выявленных на этапе исследования работы щелевого сопла на «холодной» модели. Вероятно, более глубокое проникновение струи в расплав способствовало созданию в подфурменной области зоны интенсивного дожигания CO до CO_2 , что, и обеспечило активный разогрев ванны по ходу продувки, учитывая, что уровень содержания основных компонентов – теплоносителей на опытных продувках был даже несколько ниже, чем на сравнительных продувках и, следовательно, не мог быть источником дополнительного прироста тепла при их сжигании.

Активный подъем шлака на опытных продувках отмечался в период максимальной интенсификации процесса окисления углерода (на диаграмме изменения уровня яркости светимости факела подъем шлака соответствует снижению уровня светимости в виду погружения в него фурмы).

Анализ диаграмм изменения уровня светимости подфурменной области подтверждает отмеченное визуально более раннее «зажигание» продувки в случае применения щелевого коаксиального сопла, что отразилось в зарегистрированном практически с первых секунд плавки ростом показаний яркости светимости факела.

Сопоставление полученных результатов по уровню выделения пыли в течение продувки при применении опытного и сравнительного наконечников (рис.4) показало следующее. Изменение уровня выделения пыли по ходу продувки, зарегистрированного датчиком ДВП-02, коррелируется с изменением уровня яркости факела для соответствующего варианта продувки с опытным или сравнительным сопловым наконечником. Так, на сравнительных плавках отмечается рост уровня яркости светимости факела по ходу продувки с достижением

наибольшего уровня по истечении примерно 2/3 длительности продувки, что также отражено на диаграмме изменения показателя уровня пыли, характеризующейся монотонным снижением ее уровня в отходящих газах от начала до конца продувки.

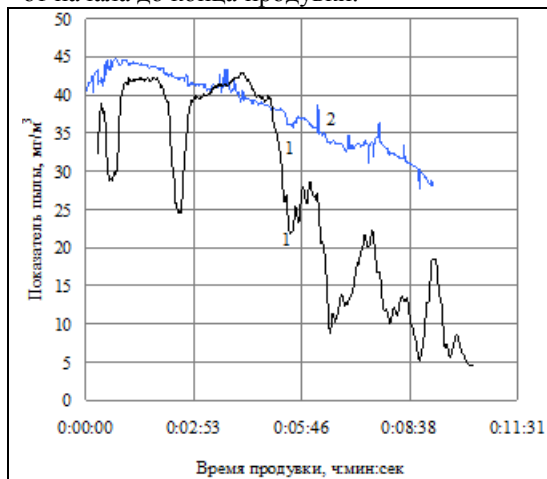


Рисунок 4 – Изменение уровня пыли, зарегистрированного датчиком ДВП-02 в отходящих газах по ходу продувок: опытной – 1 и сравнительной – 2 плавков

В случае применения коаксиального щелевого сопла примерно до 5-й минуты продувки зарегистрирован высокий уровень светимости факела, что соответствует более высокому из зарегистрированных в этом варианте значений уровню пыли в отходящих газах в этот период. Далее по ходу продувки с активным вспениванием шлака уровень пыли снижался, как и снижался уровень яркости факела. Однако при увеличении яркости светимости факела в конце продувки, связанной с дожиганием СО до СО₂, в опытном варианте уровень пыли также несколько увеличился, но его максимальное значение было ниже, чем максимумы, соответствующие предыдущим периодам плавки.

При этом отмечено, что опытные плавки, несмотря на визуально более жесткий характер продувки, отличались более низким уровнем выделения пыли по ходу продувки, чем на сравнительных плавках (в первой половине продувки и до середины продувки до активного вспенивания шлака на 0- 6 %, и на 23-62 % во второй период продувки после активного вспенивания шлака).

Выводы. Таким образом, проведенное высокотемпературное моделирование взаимодействия кислородной струи, истекающей из коаксиального щелевого сопла, с металлическим расплавом, подтвердило полученные на этапе «холодного» моделирования результаты о более высоком уровне ее динамического напора и глубоком проникновении ее в расплав. Отмечены визуальные различия в поведении ванны по ходу продувки в случае применения опытного наконечника: раннее зажигание

плавки, активное усвоение извести и визуально более жесткий характер продувки с формированием меньшего количества шлака, чем на плавках с применением четырех соплового наконечника. Выявлено, что применение опытного наконечника способствует повышению уровня светимости подфурменной области и температуры отходящего дыма, что свидетельствует о большем, чем на сравнительных плавках, разогреве ванны, вероятно, за счет более активного дожигания формируемого в ходе продувки CO до CO₂. Также отмечен более низкий уровень выделения пыли в случае применения коаксиального щелевого соплового наконечника по сравнению с продувкой через четырех сопловый наконечник на 6% - до момента активного вспенивания шлака и на 23-62% - после вспенивания шлака.

Библиографический список

1. *Технология* производства стали в современных конвертерных цехах. / С.В. Колпаков, Р.В. Старов, В.В. Смоктий и др. М.: Машиностроение, 1991. - 464 с.
2. *Вишкарёв А.Ф.* Совершенствование конвертерного производства стали за рубежом // *Новости черной металлургии за рубежом.* 1995. - № 3. - С. 42-46.
3. *Чернятевич А.Г.* Высокотемпературное моделирование кислородно-конвертерного процесса/ А.Г. Чернятевич // *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* – 1991. - № 12. – С. 16-18.
4. *Протопопов Е.В.* Теория и технология высокотемпературного моделирования конвертерных процессов / Е.В. Протопопов, С.В. Фейлер // *Вестник РАЕН (ЗСО): ЭБ.* -2016.-№18.-с.93-105.
5. *Чернятевич А.Г.* Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 1 / А. Г. Чернятевич // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2015. – №4. – С. 24–31
6. *Чернятевич А.Г.* Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 2 / А. Г. Чернятевич // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2015. – №5. – С. 10-18

Reference

1. *Tekhnologiya proizvodstva stali v sovremennykh konvertornykh tsekhakh.* / S.V. Kolpakov, R.V. Starov, V.V. Smoktiy i dr. M.: Mashinostroyeniye, 1991. - 464 s.
2. *Vishkarev A.F.* Sovershenstvovaniye konvertornogo proizvodstva stali za rubezhom // *Novosti chernoy metallurgii za rubezhom.* 1995. - № 3. - S. 42-46.
3. *Chernyatevich A.G.* Vysokotemperaturnoye modelirovaniye kislородno-konvertornogo protsessa/ A.G. Chernyatevich // *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya.* – 1991. - № 12. – S. 16-18.

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

4. Protopopov Ye.V. Teoriya i tekhnologiya vysokotemperaturnogo modelirovaniya konvertornykh protsessov / Ye.V. Protopopov, S.V. Feyler //Vestnik RAYEN (ZSO): EB. -2016.-№18.-с.93-105.

5. Chernyatevich A.G. Razrabotka dut'yevogo i shlakovogo rezhimov konverterno y plavki pri verkhney kislorodnoy produvke. Soobshcheniye 1 / A. G. Chernyatevich // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2015. – №4. – S. 24–31

6. Chernyatevich A.G. Razrabotka dut'yevogo i shlakovogo rezhimov konverterno y plavki pri verkhney kislorodnoy produvke. Soobshcheniye 2 / A. G. Chernyatevich // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2015. – №5. – S. 10-18

С. І. Семикін, Т. С. Голуб, С. А. Дудченко, В. В. Вакульчук

Високотемпературне дослідження особливостей продувки металу в конвертері через верхню кисневу фурму з кільцевим щілинним соплом

Метою роботи є дослідження на фізичній моделі кисневого конвертера взаємодії кисневої струменя, що витікає з коаксіального щілинного сопла, з залізуглецевих розплавом. При холодному моделюванні продувки було встановлено, що струмінь газу з сопла по осі поширення у порівнянні з циліндричним соплом має більший динамічний напор, в результаті чого глибше проникає в рідину. Порівняльний аналіз відео матеріалів, отриманих при проведенні високотемпературних плавок, виявив газодинамічні відмінності в характері взаємодії струменя з коаксіального щілинного сопла з поверхнею розплаву, особливо на початку продувки плавки, коли ще не сформована шлакова емульсія. Зіставлення результатів високотемпературного моделювання струменя коаксіального щілинного сопла з роботою чотирехсоплового наконечника показало, що спостерігається більш раннє запалення плавки, активне засвоєння вапна і візуально більш жорсткий характер продувки з формуванням меншої кількості шлаку, ніж на порівняльних плавках. Підтверджено отримані на етапі «холодного» моделювання висновки про більш високої динамічний натиск і глибоке проникнення у розплав струменя при застосуванні коаксіального щілинного сопла. Виявлено, що застосування коаксіального щілинного сопла сприяє більшому розігріву ванни і зниження рівня виділення пилу.

Ключові слова: конвертер, високотемпературне моделювання, верхня продування, коаксіальне щілинне сопло, пиловиділення

S. I. Semykin, T. S. Golub, S. A. Dudchenko, V. V. Vakulchuk

High-temperature study of the features of metal blowing in the converter through the top oxygen lance with an annular slit nozzle

The aim of the work is to study on the physical model of an oxygen converter the interaction of an oxygen jet flowing from a coaxial slotted nozzle with an iron-carbon melt. During cold modeling of the blowdown, it was found that the gas jet flowing out of the nozzle along the propagation axis has a large dynamic pressure compared to the cylindrical nozzle, as a result of which it penetrates deeper into the liquid. Comparative analysis of video materials obtained during high-temperature melting revealed gas-dynamic differences in the nature of the interaction of the jet from the coaxial slit nozzle

with the surface of the melt, especially at the beginning of the melt blowing, when the slag emulsion was not yet formed. Comparison of the results of high-temperature modeling of the interaction of the oxygen jet flowing from the coaxial slit nozzle with the metal melt when compared with the work of the four-nozzle tip showed that earlier ignition of the heat was observed, active absorption of lime and visually more rigid character of the blowdown with the formation of a smaller amount of slag than in the comparative melts. The conclusions obtained at the «cold» modeling stage were confirmed on a higher dynamic head and deep penetration into the jet melt using an experienced tip. It is revealed that the use of an experienced tip contributes to a greater heating of the bath and a reduction in the level of dust.

Keywords: converter, high-temperature modeling, top-blowing, coaxial slotted nozzle, dust extraction

*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. Б.М.Бойченко; д.т.н. А.С.Вергун*