

С.И. Семькин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: isisemykin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7365-2259>

Т.С. Голуб, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: dove@email.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9269-2953>

С.А. Дудченко, науч. сотр., e-mail: s.dudchenko@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7319-9896>

В.В. Вакульчук, мл. науч. сотр., e-mail: vvvakulchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7887-284>

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (Днепр, Украина)

Высокотемпературное исследование особенностей продувки металлической ванны в LD конвертере через кольцевое коаксиальное сопло

Процесс взаимодействия высокоскоростной газовой струи окислителя, истекающей из верхней продувочной фурмы, при кислородном LD конвертировании с расплавом является определяющим и решающим фактором развития и протекания тепловых и обменных процессов. В работе представлены результаты высокотемпературного исследования характера и особенностей продувки металлического расплава через верхнюю фурму с кольцевым коаксиальным соплом на базе 60-кг лабораторного конвертера в сопоставлении с работой четырехсопловой наконечника. На базе непрерывной видеозаписи скоростной камерой с частотой 300 кадров в секунду и регистрации технологических показателей изучен характер взаимодействия кислородной струи с жидкой ванной и подтверждены полученные на этапе «холодного» моделирования выводы о более высоком динамическом напоре и глубоком проникновении в расплав струи при применении опытного наконечника. Выявлено более раннее зажигание плавки и значительное повышение уровня температуры подфурменной области, зарегистрированной пирометром, вероятно, за счет создания в подфурменной области зоны интенсивного дожигания CO до CO₂. Однако глубокое проникновение струи обусловило более жесткий характер продувки с формированием меньшего количества шлака, вероятно, за счет меньшего поступления окислов железа в шлак, чем на сравнительных плавках. По величине снижения уровня углерода в расплаве в сопоставлении со сравнительными плавками при сопоставимом уровне количества поданного кислорода установлено увеличение доли кислорода, расходуемого на окисление углерода при применении опытного наконечника, с соответствующим повышением скорости окисления углерода по ходу продувки.

Ключевые слова: Кислородно-конвертерный процесс, высокотемпературное моделирование, верхняя кислородная фурма, кольцевое коаксиальное сопло.

В кислородно-конвертерной ванне протекает сложный комплекс явлений, среди которых процесс взаимодействия газовой струи окислителя с расплавом является первичным и определяющим фактором в прохождении физико-химических и тепло-массообменных процессов при плавке [1–3].

Совершенствование дутьевых режимов является одним из высокоэффективных энерго- и ресурсосберегающих направлений, позволяющих достаточно быстро и без значительных финансовых затрат существенно улучшить технико-экономические показатели производства конвертерной стали. Однако на сегодняшний день вопросу эффективности усвоения кислорода металлическим расплавом на протекание основных окислительных реакций из его общего ко-

личества, подаваемого на плавку, не уделяют должного внимания [4].

Физическое моделирование продувки через кольцевой коаксиальный сопловой наконечник (способствующий снижению рассеивания потока [5]) при применении его с верхней кислородной фурмой выявило, что истекающая из него струя газа по оси распространения обладает большим, по сравнению с одним цилиндрическим соплом, динамическим напором, в результате чего глубже проникает в жидкость [6].

Цель данной работы – высокотемпературное исследование особенностей продувки железоуглеродистого расплава с использованием кольцевого коаксиального сопла.

Методика проведення високотемпературних експериментів. Опиту були проведені в умовах лабораторного участка Дніпровського державного технічного університету (ДГТУ) на 100-кг моделі кислородного конвертера [7–8], изготовленого в масштабі 1:30 к промисловому 160-т конвертеру. В модель заливали порядку 60 кг чугуна с температурой 1360–1400 °С и продували технічески чистим кислородом (чистотой порядку 99,5 %) до «падения» факела порядку 12 минут. По ходу продувки присаживали по 1,2 кг извести и 0,06 кг шпата на первой, третьей и пятой минутах. В течение продувки каждые три минуты производили отбор проб металла.

Опытные продувки осуществляли при использовании наконечника фурмы с кольцевым коаксиальным щелевым соплом, образованным внутренним диаметром вставки $6 \cdot 10^{-3}$ м и наружным диаметром прутка, закрепленного внутри соплового наконечника, – $5 \cdot 10^{-3}$ м (далее опытный наконечник). Сравнительные продувки были проведены с использованием четырехсоплового наконечника (диаметр сопла – $1,7 \cdot 10^{-3}$ м, угол наклона сопел к вертикальной оси фурмы – 14°) (далее сравнительный наконечник). Сечение опытного сопла и сравнительного выбраны равновеликими, исходя из подобия промисловому конвертеру с 4-х сопловым наконечником, с диаметром сопел Лавалля $40 \cdot 10^{-3}$ м каждое. Опытные и сравнительные плавки были проведены в сопоставимых технологических условиях. В течение всей продувки производилась видеозапись подфурменной реакционной области ванны через смотровое окно модели с помощью скоростной видеокамеры CASIO EXILIM EX F1 и регистрация уровня светимости подфурменной зоны пирометром Benetech GM2200 (характеризовала степень разогрева сталеплавильной ванны).

Результаты експериментів и их обговорення. Сопоставительный анализ видео полученных материалов выявил газодинамические различия в характере взаимодействия струи с поверхностью расплава, особенно явно заметные в начале продувки плавки, когда еще не сформирована шлаковая эмульсия. Так, на этапе до зажигания плавки в случае применения опытного наконечника в подфурменной области формируются кольцевые зоны внедрения струи в железо-углеродистый расплав (рис. 1), подобные выявленным при проведении холодного моделирования с использованием жидкой среды [6]. В случае применения сравнительного наконечника было отмечено формирование четырех зон внедрения от каждой из струй, что характерно для работы данного типа наконечников [9–10]. Также было отмечено, что при применении опытного наконечника зажигание продувки наступало быстрее и составляло порядку 8–15 секунд против 12–25 секунд в случае применения сравнительного наконечника. Это, по-видимому, связано с большим уровнем динамического напора, создаваемого струей, истекающей из опытного соплового наконечника.

Также отмечено, что продувка с применением опытного соплового наконечника, по визуальной оценке, отличалась большим периодом времени без «задымления» факела.

Однако следует отметить, что на плавках с применением опытного наконечника было сформировано значительно меньшее, чем на сравнительных плавках, количество шлака, и наблюдался 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

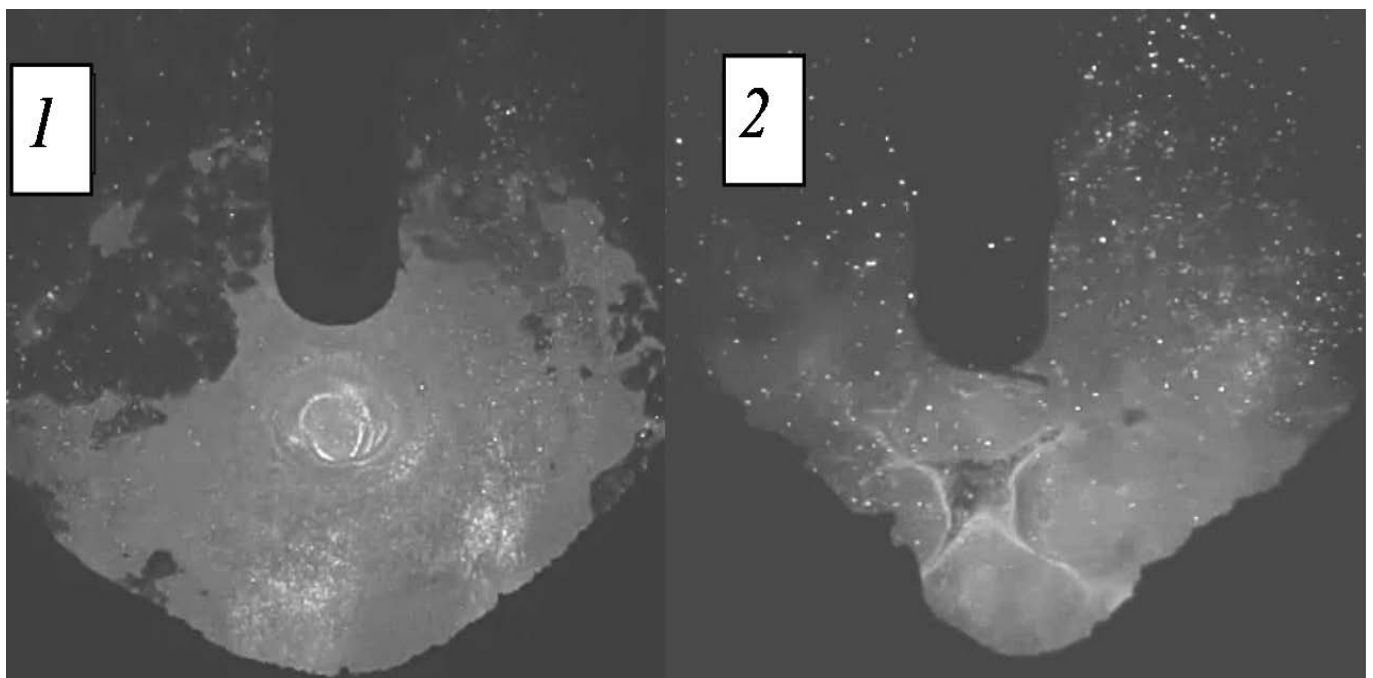


Рис. 1. Фрагмент видеозаписи начала продувки через фурму с опытным наконечником – 1, и сравнительным наконечником – 2

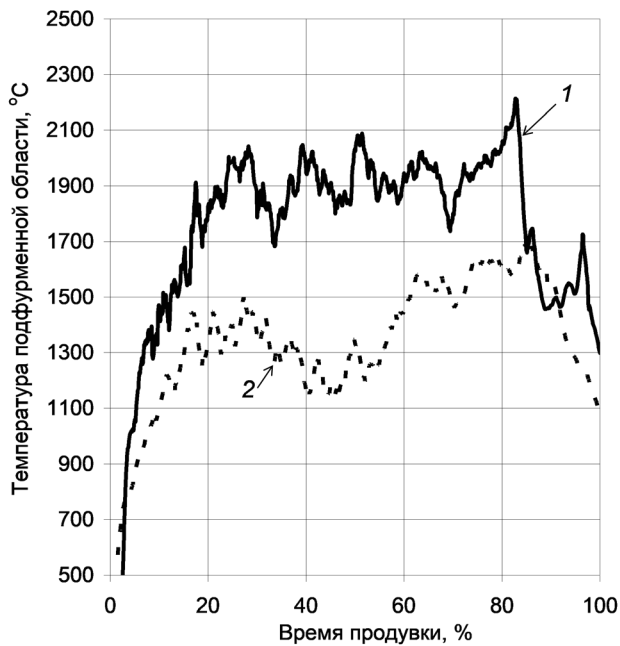


Рис. 2. Изменение уровня светимости подфурменной области по ходу продувки с применением: опытного наконечника (1) и сравнительного наконечника (2); для сопоставления продувок, имеющих различную длительность, время продувки выражено в относительных процентах

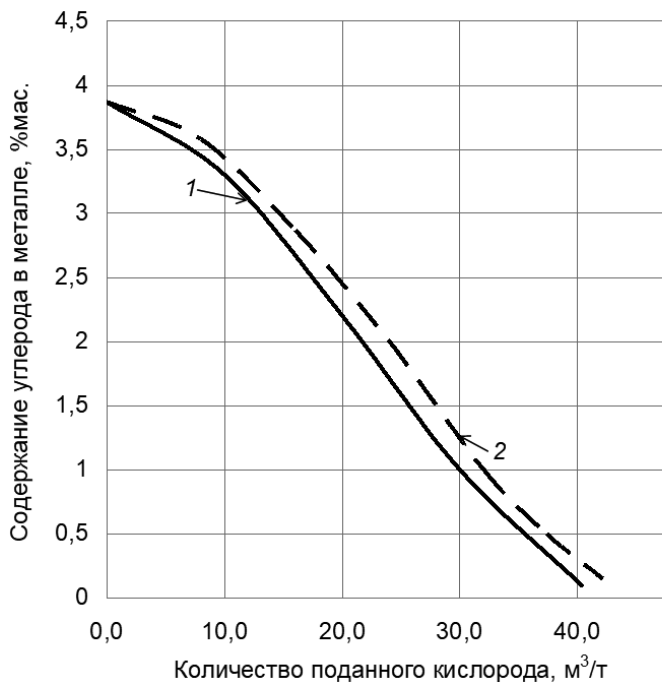
жидкость, выявленных на этапе исследования работы щелевого сопла на «холодной» модели.

Анализ изменения зарегистрированной пирометром температуры подфурменной области (рис. 2), качественно характеризующей разогрев ванны, подтверждает отмеченное визуально более раннее «зажигание» продувки в случае применения щелевого

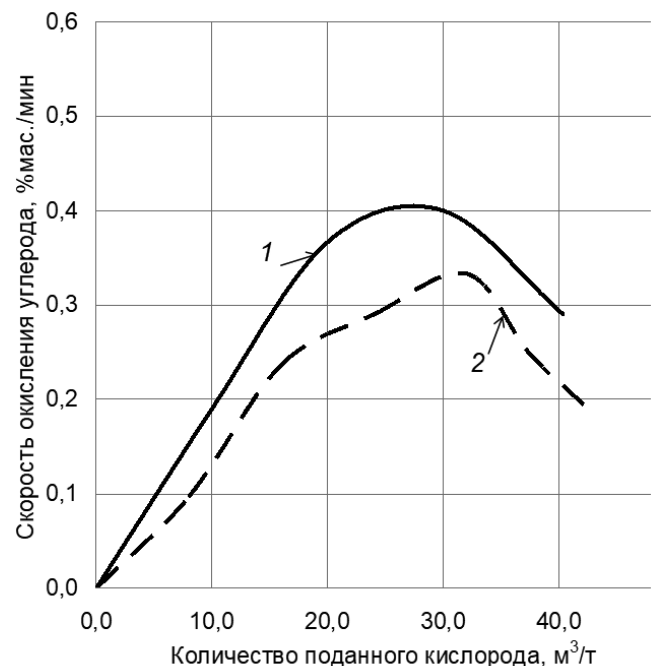
коаксиального сопла, что отразилось в зарегистрированном, практически с первых секунд плавки, ростом показаний температуры.

Так, в начальный период продувки температура в подфурменной области в варианте применения опытного наконечника была больше на 300–400 °С, по сравнению с продувкой через сравнительный наконечник, а в основной период продувки – на величину порядка 500 °С. При этом отмечено, что продувка через опытный наконечник отличалась максимальной степенью разогрева подфурменной области до температур порядка 1900–2000 °С в течение практически всей длительности продувки плавки. Вероятно, более глубокое проникновение струи в расплав способствовало созданию в подфурменной области зоны интенсивного дожигания СО до СО₂, что и обеспечило активный разогрев подфурменной области, учитывая, что уровень содержания основных компонентов – теплоносителей на опытных продувках был на сопоставимом уровне со сравнительными продувками и, следовательно, не мог быть источником дополнительного прироста тепла.

Сопоставление и анализ изменения уровня содержания углерода в металле и скорости окисления углерода по ходу продувки плавки от количества поданного в течение продувки кислорода выявили классический характер зависимостей для анализируемых сопловых наконечников с существенным увеличением расхода кислорода при низком содержании углерода в металле (рис. 3) [11]. При этом отмечено, что в случае применения опытного наконечника содержание углерода в металле при одном и том же количестве поданного на продувку кислорода ниже, чем в варианте применения сравнительного наконеч-



а



б

Рис. 3. Зависимость содержания углерода в металле (а) и скорости окисления углерода (б) по ходу продувки от количества поданного в течение продувки кислорода при применении: опытного наконечника (1), и сравнительного наконечника (2)

ника, что свидетельствует о большей степени усвоения кислорода ванной на протекание «основных» для конвертирования реакций окисления углерода, вероятно, за счет глубокого проникновения струи в расплав (см. рис. 3, а).

Подтверждением этому также являются результаты анализа изменения скорости окисления углерода (см. рис. 3, б): применение опытного наконечника способствует повышению скорости окисления углерода уже с начала продувки на 10–25 % с поддержанием ее на более высоком уровне в среднем на 20–30 % далее в течение продувки.

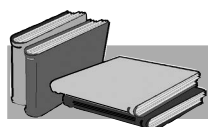
Выводы

Таким образом, проведенное высокотемпературное моделирование взаимодействия кислородной струи, истекающей из кольцевого коаксиального сопла, с металлическим расплавом, подтвердило полученные на этапе «холодного» моделирования ре-

зультаты 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: формирования кольцевой зоны внедрения, раннее зажигание плавки и визуально более жесткий характер продувки с формированием меньшего количества шлака.

Выявлено, что применение опытного наконечника способствует повышению теплового уровня подфурменной области, что косвенно свидетельствует о большем, чем на сравнительных плавках, разогреве ванны, вероятно, за счет более активного дожигания формируемого в ходе продувки CO до CO₂.

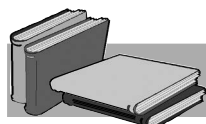
Анализ изменения содержания углерода и скорости его окисления по ходу продувки плавки выявил увеличение доли кислорода, расходуемого на окисление углерода при применении опытного наконечника, с соответствующим повышением скорости окисления углерода по ходу продувки.



ЛИТЕРАТУРА

1. Vaclav Smil. Transforming the twentieth century: technical innovations and their consequences. Volume 2. Oxford University Press US. ISBN 0-19-516875-5. 2006. 368 p.
2. Toshihiko Emi. Steelmaking Technology for the Last 100 Years: Toward Highly Efficient Mass Production Systems for High Quality Steels. ISIJ Int. 2015. Vol. 55. Iss. 1. P. 36–66.
3. Сущенко А.В. Совершенствование и оптимизация дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2009. Вип. 19. С. 36–40.
4. Лухтура Ф.И. О степени усвоения кислорода металлической ванной при верхнем вдуве в LD-конвертере. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки*. 2018. Вип. 36. С. 39–53.
5. Verma S.B., Stark R., Nuerenberger-Genin C., Haidn O. Coldgas experiments to study the flow separation characteristics of a dual-bell nozzle during its transition modes. *Shock Waves*. 2010. Vol. 20. Iss. 3. P. 191–203.
6. Голуб Т.С., Дудченко С.А., Вакульчук В.В. Изучение на физической модели особенностей продувки сверху через коаксиальное сопло. Материалы Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», Могилев, 26–27 апреля 2018. С. 121–122.
7. Чернятевич А.Г. Высокотемпературное моделирование кислородно-конвертерного процесса. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 1991. № 12. С. 16–18.
8. Протопопов Е.В., Фейлер С.В. Теория и технология высокотемпературного моделирования конвертерных процессов. *Вестник РАН (ЗСО): ЭБ*. 2016. № 18. С. 93–105.
9. Чернятевич А.Г. Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 1. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 4. С. 24–31.
10. Чернятевич А.Г. Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 2. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 5. С. 10–18.
11. Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология. Днепропетровск: Днепр-ВАЛ, 2006. 454 с.

Поступила 13.09.2019



REFERENCES

1. Vaclav Smil (2006). Transforming the twentieth century: technical innovations and their consequences, Volume 2. Oxford University Press US, ISBN 0-19-516875-5, 368 p. [in English].
2. Toshihiko Emi (2015). Steelmaking Technology for the Last 100 Years: Toward Highly Efficient Mass Production Systems for High Quality Steels. ISIJ Int. Vol. 55. Iss.1, pp. 36–66 [in English].
3. Sushenko, A. V. (2009). Improvement and optimization of blow modes and devices of oxygen converters. *Vistnyk Pryazovs'kogo tehnichnogo universytetu*, vol. 19, pp. 36–40 [in Russian].
4. Lukhtura, F.I. (2018). About the degree of assimilation of oxygen in a metal bath with top blowing in an LD converter. *Vistnyk Pryazovs'kogo tehnichnogo universytetu*, vol. 36, pp. 39–53 [in Russian].
5. Verma, S.B., Stark, R., Nuereberger-Genin, C., Haidn, O. (2010). Cold-gas experiments to study the flow separation characteristics of a dual-bell nozzle during its transition modes. *Shock Waves*, vol. 20, iss. 3, pp. 191–203 [in English].
6. Holub, T.S., Dudchenko, S.A., Vakul'chuk, V.V. (2018). Study on a physical model of the features of top blowing through a coaxial nozzle. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Materialy, oborudovanie i resursosberegachshie tekhnologii"*, Mogilev, 26–27 aprelia 2018. Materials of the International scientific and technical conference "Materials, equipment and resource-saving technologies", Mogilev, April 26–27, 2018, pp. 121–122 [in Russian].
7. Cherniatevich, A.G. (1991). High-temperature modeling of the oxygen-converter process. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya. Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, vol. 12, pp. 16–18 [in Russian].
8. Protopopov, Ye.V., Feiler, S.V. (2016). Theory and technology of high-temperature modeling of converter processes. *Vestnik RAEN. Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*, vol. 18, pp. 93–105 [in Russian].
9. Cherniatevich, A.G. (2015). Development of blowing and slag modes of converter smelting with top oxygen blowing. Report 1. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and Mining Industry*, vol. 4, pp. 24–31 [in Russian].
10. Cherniatevich, A.G. (2015). Development of blowing and slag modes of converter smelting with top oxygen blowing. Report 2. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and Mining Industry*, vol. 5, pp. 10–18 [in Russian].
11. Boychenko, B.M., Okhotskiy, V.B., Harlashin, P.S. (2006). Converter steel production: theory, technology, steel quality, unit designs, material recycling and ecology. Dnepropetrovsk: Dnepr-VAL, 454 p. [in Russian].

Received 13.09.2019

Анотація

С.І. Семикін, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: isisemykin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7365-2259>; **Т.С. Голуб**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: dove@email.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9269-2953>; **С.О. Дудченко**, наук. співр., e-mail: s.dudchenko@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7319-9896>; **В.В. Вакульчук**, мол. наук. співр., e-mail: vvvakulchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7887-284>

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Високотемпературне дослідження особливостей продувки металеві ванни в LD конвертері через кільцеве коаксіальне сопло

Процес взаємодії високошвидкісного газового струменя окислювача, що витікає з верхньої продувної фурми, при кисневому LD конвертуванні з розплавом є визначальним і вирішальним фактором розвитку і протікання теплових та обмінних процесів. В роботі представлено результати високотемпературного дослідження характеру й особливостей продувки металевого розплаву через верхню фурму з кільцевим коаксіальним соплом на базі 60-кг лабораторного конвертера в зіставленні з роботою чотирьохсоплового наконечника. На базі безперервного відеозапису швидкісною камерою з частотою 300 кадрів в секунду та реєстрації технологічних показників вивчено характер взаємодії кисневого струменя з рідкою ванною й підтверджено отримані на етапі «холодного» моделювання висновки про більш високий рівень динамічного натиску і глибоке проникнення в розплав струменя при застосуванні дослідного наконечника.

Виявлено більш раннє запалення плавки і значне підвищення рівня температури підфурменої області, зареєстрованої пірометром, ймовірно, за рахунок створення в підфурменій області зони інтенсивного допалювання CO до CO₂. Однак глибоке проникнення струменя зумовило більш жорсткий характер продувки з формуванням меншої кількості шлаку, ймовірно, за рахунок меншого надходження оксидів заліза в шлак, ніж на порівняльних плавках. За величиною зниження рівня вуглецю в розплаві в зіставленні з порівняльними плавками при порівнянній кількості поданого кисню встановлено збільшення частки кисню, що витрачається на окислення вуглецю при використанні дослідного наконечника, з відповідним підвищенням швидкості окислення вуглецю за ходом продувки.

Ключові слова

Киснево-конвертерний процес, високотемпературне моделювання, верхня киснева фурма, кільцеве коаксіальне сопло.

Summary

S.I. Semykin, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: isisemykin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7365-2259>; **T.S. Golub**, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: dove@email.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9269-2953>; **S.A. Dudchenko**, Researcher, e-mail: s.dudchenko@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7319-9896>; **V.V. Vakulchuk**, Junior Researcher, e-mail: vvvakulchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7887-284>

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

High-temperature study of features of blowing a metal bath in LD converter through the annular coaxial nozzle

The process of interaction of a high-speed gas stream of an oxidizing agent flowing from the top blowing lance during oxygen LD conversion with melt is a determining and decisive factor in the development and occurrence of thermal and exchange processes. The paper presents the results of a high-temperature study of the nature and characteristics of blowing a metal melt through the top lance with an annular coaxial nozzle based on a 60-kg laboratory converter in comparison with the work of four nozzle tips. On the basis of continuous video recording by a high-speed camera with a frequency of 300 frames per second and recording of technological indicators, the nature of the interaction of an oxygen jet with a liquid bath was studied and the conclusions obtained at the "cold" modeling about higher dynamic pressure and deep penetration into the melt of the jet using an experienced tip were confirmed. Earlier ignition of the melting and a significant increase in the temperature of the sub-lance area recorded by the pyrometer were revealed, probably due to the creation of a zone of intense postcombustion of CO to CO₂ in the sub-lance region. However, the deep penetration of the jet led to a more stringent blowing with the formation of a smaller amount of slag, probably due to a smaller intake of iron oxides in the slag than in comparative heat. According to the magnitude of the decrease in the level of carbon in the melt compared to comparative melts at the same level of the amount of oxygen supplied, an increase in the proportion of oxygen spent on carbon oxidation using an experimental tip was found, with a corresponding increase in the rate of carbon oxidation during the blowing.

Keywords

Oxygen-converter process, high-temperature modeling, top oxygen lance, annular coaxial nozzle.