

Purpose: Analysis of the impact of uncontrolled BOF melting parameters (degree of post-combustion CO to CO₂, carbon and silicon content in the pig iron, specific consumption of fuel consumption, the heat losses of the BOF and others) on the material and energy consumption of steel.

Methodology: The study was performed by using of mathematical modeling of BOF melt based on the thermal and mass balances.

Findings: The paper describes analysis of the influence of the main parameters and characteristics of charge materials used in the BOF melting on metal charge and energy consumption. It is shown that for resolving of current industrial problems the use of additional materials in the BOF process, such as scrap, solid iron, magnesia flux, heat carrier results to a significant increase in

energy consumption of steel up to 42 kilogram of coal equivalent / t.

Originality: The influence of uncontrollable factors of BOF melt on material and energy consumption of steel.

Practical value. Development of the theory and practice of BOF melt with the influence of uncontrollable parameters on material and energy consumption of steel.

Key words: converter, power consumption, metallic charge, steel, technology, consumption

Рекомендована к публикации
д. т. н. К. Г. Низяевым

Поступила 07.11.2016



УДК 669.184.244.66

Наука

С. И. Семькин /к. т. н./, Т. С. Голуб /к. т. н./,
Е. В. Семькина, С. А. Дудченко,
В. В. Вакульчук

Институт черной металлургии НАН Украины,
г. Днепро, Украина
e-mail: isisemykin@gmail.com

Поведение металлической фазы в шлаке в процессе продувки железоуглеродистого расплава в конвертере

S. I. Semykin /Cand. Sci. (Tech.)/,
T. S. Golub /Cand. Sci. (Tech.)/, E. V. Semykina,
S. A. Dudchenko, V. V. Vakulchuk

Iron and steel institute of NAS of Ukraine,
Dnipo, Ukraine
e-mail: isisemykin@gmail.com

Behaviour of the metal phase in slag during the blowing of ironcarbonaceous melt in the converter

Цель. Изучение особенностей формирования металлической фазы в шлаке в процессе продувки металла в конвертере, в том числе в условиях наложения низковольтного электрического потенциала на сталеплавильную ванну.

Методика. Промышленные эксперименты в 160-т конвертерах, отбор проб металла и шлака по технологическим периодам продувки плавки, анализ фракционного и химического состава металлической части шлака, аналитико-графическая оценка результатов экспериментов.

Результаты. Анализ фракционного состава корольков подтвердил наличие различных механизмов их поступления в шлаковый расплав: за счет газодинамического разбрызгивания кислородной струей и выносимых капелек металла с пузырьками CO. В работе показано позитивное влияние низковольтного потенциала на снижение количества корольков в шлаке.

Научная новизна. Показано, что подвод отрицательной полярности потенциала к фурме в наибольшей степени снижает общее количество корольков в шлаке, повышая при этом долю крупных капель, способных вернуться в металл. Установлено, что при достижении содержания углерода в металлическом расплаве уровней 0,25; 0,5 и 0,8% изменяется соотношение скоростей окисления углерода в пределах корольков и в основной массе сталеплавильной ванны, что, вероятно, связано со структурными изменениями, происходящими в металлическом расплаве.

Практическая значимость. Определяется разработкой эффективных ресурсосберегающих вариантов технологии конвертерной плавки на базе полученных в промышленных условиях новых научных

и технологических результатов, позволяющих минимизировать потери металла с корольками. (Ил. 3. Библиогр.: 9 назв.)

Ключевые слова: железоуглеродистый расплав, металлические корольки, фракционный состав, окисление углерода, конвертерный процесс.

Постановка проблемы. Современный кислородно-конвертерный процесс, несмотря на огромное разнообразие используемых на практике вариантов, имеет общую проблему, связанную с существенным разбрызгиванием продуваемых расплавов, как следствие – насыщение шлака каплями металла (корольками), механизм формирования и поведения которых представляет особенную актуальность и в настоящее время.

Цель работы – изучение особенностей формирования металлической фазы в шлаке в процессе продувки плавки, в том числе в условиях наложения низковольтного электрического потенциала на сталеплавильную ванну.

Методика исследований. Исследования проводились на 160-т конвертерах, оборудованных системой наложения низковольтных потенциалов, работающих по технологии с продувкой сверху при постоянном расходе кислорода и нерегулируемом рабочем положении фурмы. Пробы шлака отбирались на двух заключительных этапах продувки: на первой повалке конвертера (18–20 мин) и после додувки на углерод или температуру (21–23 мин) сразу после наклона конвертера с одного и того же участка ванны. Застывший шлак взвешивали, размалывали и отмагничивали железную составляющую – корольки, которые затем рассеивали ситовым методом на фракции с размерами: менее 0,05; 0,05–0,08; 0,08–0,16; 0,16–0,25; 0,25–0,50; 0,50–1,0; 1,0–2,0; более 2,0 мм. Каждую фракцию взвесили и рассчитали долевые части в общей массе. Изучено 84 пробы шлака по трем вариантам ведения плавки: 1 – без электрических воздействий, 2 и 3 – подведением низковольтного потенциала к продувочной фурме отрицательного и положительного полюсов от источника постоянного тока соответственно.

Обсуждение результатов исследования. Как известно, количество корольков в шлаке отражает динамический процесс их поступления в шлак и возвращения обратно в металл. Анализ распределения долевого содержания корольков от их общей массы показал возрастание количества корольков фракции 0,25–0,50 мм и 1,0–2,0 мм, из чего можно предположить, что поступление корольков в основном обусловлено активностью двух процессов. Первый процесс связан с поступлением в шлак более мелкой фракции (с максимумом размеров 0,25–0,50 мм),

образующейся за счет разрыва поверхности металлической пленки, охватывающей пузырьки CO, в момент прохождения через шлако-металлическую фазу. Интенсивность этого процесса напрямую связана со скоростью и активностью протекания процесса обезуглероживания расплава. Второй процесс связан с поступлением в шлак крупных капель металла (с максимумом 1,0–2,0 мм) и обусловлен газодинамическим ударным воздействием кислородной струи на металлический расплав с образованием брызг металла.

Поступившие в шлак корольки, находясь в поле действия гравитационных сил, имеют возможность возвращаться в металлическую ванну. Известно, что корольки с размерами более 2,0 мм (крупные) успевают «осесть» в металлическую ванну за время ожидания анализа, а менее 2,0 мм (мелкие) в течение длительного периода находятся в шлаке [1].

О характере протекания конвертерного процесса в первую очередь можно судить по скорости окисления углерода в металле, так как процесс обезуглероживания не только определяет интенсивность и полноту протекания всех рафинировочных и обменных процессов за время продувки плавки, но и влияет на особенности образования шлака, его свойства, активность процесса перемешивания металла со шлаком и поступления металлических капель в шлак. Первоначально выполнена оценка влияния содержания углерода в металле на указанных выше этапах продувки на величину содержания корольков в шлаке. Для этого массив плавов был разделен: на этапе первой повалки на три уровня, С % масс.: 0,05–0,08; 0,15–0,19 и 0,25–0,27, а после додувки плавки на два уровня, С % масс.: 0,03–0,08 и 0,09–0,15 (рис. 1).

Выбранные диапазоны содержания углерода определялись, исходя из приближения к так называемым «критическим» концентрациям, достигаемым при выплавке металла в кислородных конвертерах в процессе окисления углерода [2–5]. Первая «критическая» концентрация углерода находится в диапазоне 0,15–0,20 % масс. Считается, что при концентрации углерода выше приведенной процесс его окисления лимитируется внешней диффузией (интенсивностью подачи кислорода). Наличие второй критической концентрации при содержании углерода в металле ниже 0,1 % обусловлено ослаблением процесса окисления, связанным со

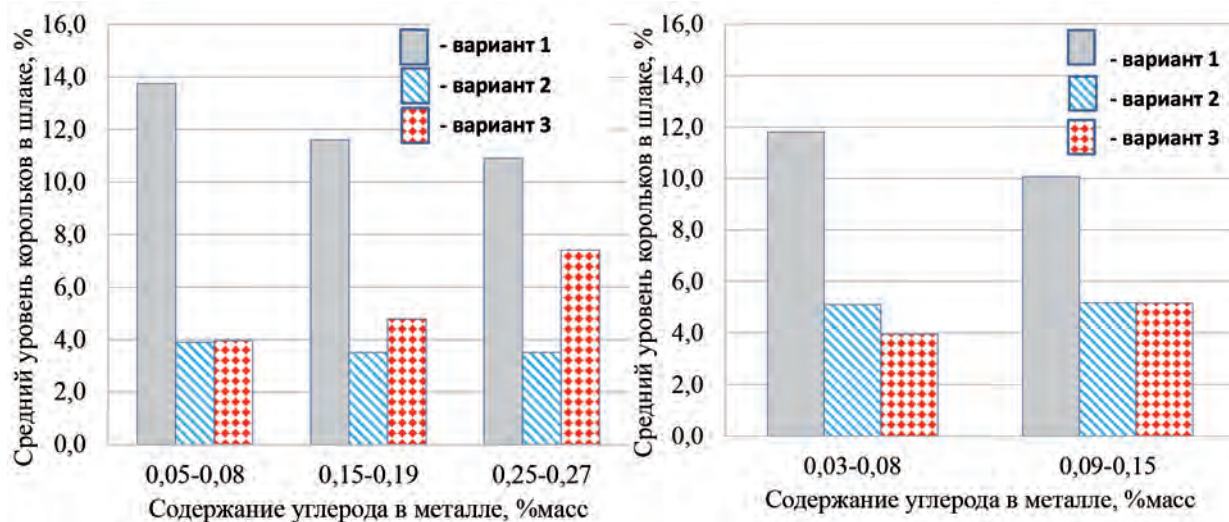


Рис. 1. Усредненное количество металлических капель в шлаке в зависимости от содержания углерода в металле на первой повалке конвертера (слева) и после дудовки (справа) по вариантам 1-3

значительным снижением массопереноса углерода к месту реакции и рассредоточением в объеме («углеродный голод»).

Анализ показал, что для плавов без воздействий на заключительных этапах продувки количество королек металла в шлаке определялось интенсивностью процесса обезуглероживания. Отмечено, что после дудовки плавки уровень содержания королек в шлаке при определенном содержании углерода в металле ниже по сравнению с такой же подгруппой по углероду, но на этапе первой повалки. Это связано с тем, что во время дудовки происходит активное окисление части королек, находящихся в шлаке, кроме этого, осуществляется поверхностный перегрев шлаковой фазы с соответствующим снижением ее вязкости, что в целом способствует возвращению королек в металлический расплав.

В вариантах 2, 3 наряду с более низким по сравнению с вариантом 1 содержанием королек в шлаке на заключительном этапе продувки, как на первой повалке конвертера, так и к концу продувки, были отмечены иные зависимости. Так, в случае применения положительной полярности, подводимой к фурме, при снижении содержания углерода в металле на этапе до первой повалки, напротив, отмечено снижение количества королек в шлаке. Отмеченный характер изменения количества королек связан, по нашему мнению, с влиянием полярности потенциала на температурные условия продувки плавки, особенно при подведении положительной полярности потенциала, способствующей значительному разогреву ванны в верхних слоях [6-7].

Выполненный фракционный анализ количества королек в пределах групп по углероду показал существенное влияние полярности по-

тенциала на долевое распределение содержания королек различного размера (на рис. 2 в качестве примера приведена диаграмма такого распределения при выплавке низкоуглеродистой стали). В рассматриваемых условиях в варианте без воздействий отмечено присутствие королек как более крупной, так и средней фракции. Причем в интервале размеров 0,25-0,50 мм отмечено наличие определенного возрастания количества королек этой фракции. Второй максимум по количеству королек соответствует фракционному размеру более 2 мм.

В варианте 2 выявлено, что на момент повалки конвертера примерно 75 % королек представляют собой капли размером более 2 мм, которые за время ожидания анализа в своем большинстве возвращаются в металлическую ванну. Такой показатель в данном случае указывает на влияние электрических воздействий на поверхностные свойства взаимодействующих фаз, способствуя слиянию (коагуляции) мелких и средних королек с образованием более крупных. При этом можно предположить, что крупные капли металла при прохождении определенного времени в большей мере оседают сквозь слой шлака, чем мелкие, чему могут способствовать определенные свойства шлака, в частности пониженная вязкость и плотность, отмечаемая при воздействии низковольтного потенциала данной полярности к концу продувки [6-7].

В варианте 3 отмечено значительно большее по сравнению с другими вариантами присутствие королек размером менее 2 мм и очень малое количество королек более 2 мм. Это связано с упомянутым выше влиянием потенциала данной полярности на температурные условия, определяющие физические свойства шлака (ра-

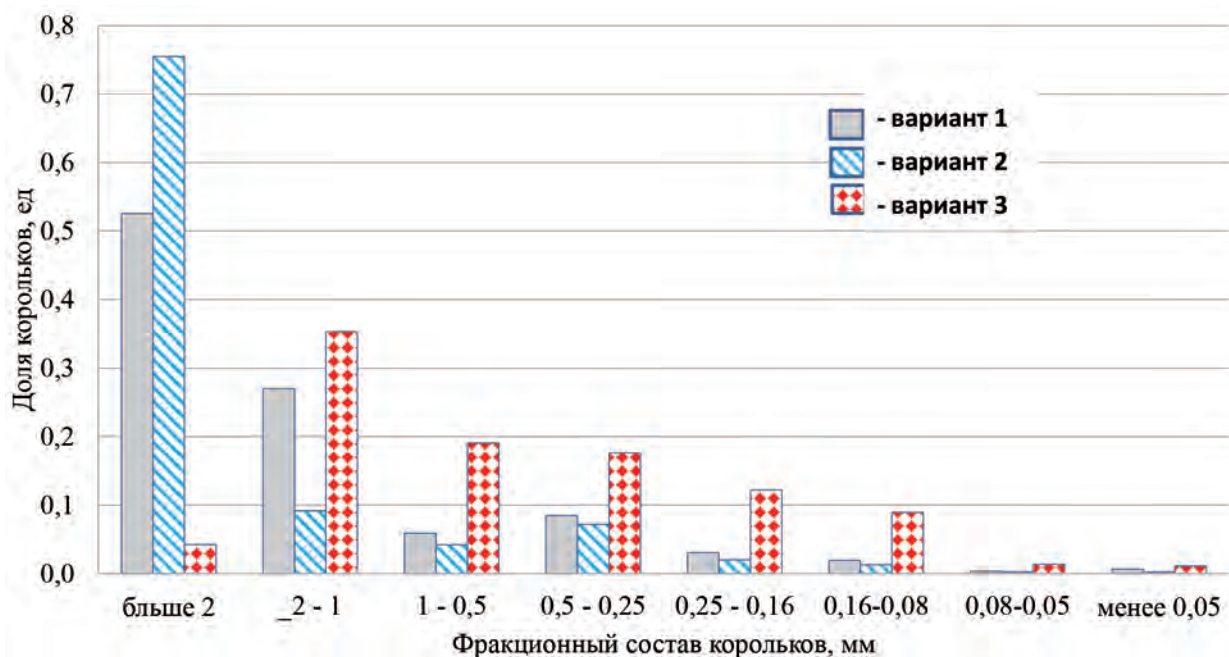


Рис. 2. Массовая доля содержания коромков при расходе общей навески на фракции при выплавке низкоуглеродистой марки стали по вариантам 1-3

нее выполненные исследования [6-7] показали, что при данной полярности к этому периоду продувки плавки формируются шлаки с наиболее низкой среди рассматриваемых вариантов вязкостью при значительно более высоком поверхностном натяжении).

Металлическая фаза, находящаяся в шлаке, подвергается окислительному воздействию окислительной газовой средой, а следовательно, элементы коромка, в первую очередь железо и углерод, составляющие большую его часть, окисляются и переходят в шлаковую и газовую фазы соответственно. В связи с этим размер коромков, находящихся в шлаке, должен уменьшаться по ходу продувки. Поведение металлических капель в шлаке может быть дополнительно оценено путем изучения изменения содержания углерода в коромках относительно крупной (более 1 мм) и мелкой (менее 1 мм) фракций в зависимости от концентрации углерода в металлической ванне (рис. 3).

Анализ показал, что как для коромков более 1 мм, так и для мелких коромков (менее 1 мм) данная зависимость имеет схожий характер с наличием минимумов и максимумов в зависимости от содержания углерода в металлическом расплаве сталеплавильной ванны (ме-

таллической матрице). Прежде всего при анализе следует отметить, что в коромках мелкой фракции (менее 1 мм) установлено более высокое содержание углерода, чем в коромках крупной фракции (более 1 мм), что коррелируется с данными работы [8]. Это подтверждает предположение о формировании части мелких коромков за счет всплывающих пузырьков СО. Углерод, являясь поверхностно активным элементом, сосредотачивается в поверхностных слоях вытесняемой пузырьками СО металлической пленки, и, соответственно, после схлопывания пузырьков обогащенный углеродом металл формирует мелкие коромки.

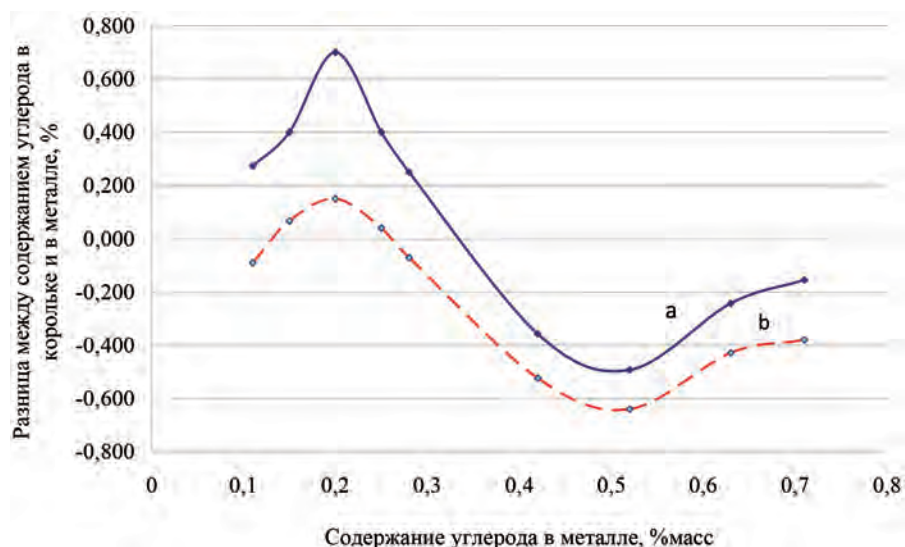


Рис. 3. Зависимость разницы между содержанием углерода в коромке и в металле от содержания последнего для коромков меньше 1 мм (а) и больше 1 мм (б)

В случае более крупных корольков, которые формируются в большей мере за счет разбрызгивания кислородной струей общей массы металла, превалирует окисление поверхностно активного углерода в результате прямого взаимодействия с кислородом струи во время их отрыва и движения в шлаковую фазу.

Схожее явление было установлено при анализе поведения корольков при внепечной обработке чугуна магнием, когда в мелких корольках по сравнению с крупными корольками содержание серы и марганца было существенно выше [9].

График зависимости соотношения скоростей окисления углерода в корольках и в конвертерной ванне, представленный на рис. 3, свидетельствует также о том, что в диапазоне содержания углерода в металлической ванне от 0,1 до 0,8 % масс. скорость окисления углерода в корольках в определенные периоды то опережает, то отстает от скорости окисления углерода в основном металле. Это подтверждает наличие определенных концентраций углерода, при которых изменяется характер протекания процесса окисления углерода, растворенного в самих корольках, что для условий данного эксперимента соответствовало его содержанию на уровне: 0,8; 0,5 и 0,25 % масс. Установленные значения по углероду коррелируют с результатами, приведенными в работе [2], посвященной исследованию разницы в содержании углерода между зоной продувки и объемом ванны. Установленный характер изменения скорости окисления углерода на заключительном этапе продувки, вероятно, отражает изменение структурного состояния, которое происходит в металлической ванне при снижении содержания углерода в расплаве. Считается, что металлический расплав при температурах конвертирования (в случае относительно небольших значениях перегрева над температурой плавления) наследует свойства и структуру ближнего порядка твердого металла, а следовательно, в процессах, связанных со структурно чувствительными свойствами расплава, могут проявиться характерные изменения при определенных согласно диаграмме состояния железо – углерод содержаниях углерода, а именно при 0,78 %, 0,52 и 0,178 %, соответствующих твердофазным превращениям.

В процессе конвертирования корольки металла, находящиеся в шлаковой фазе и отличающиеся огромной удельной поверхностью, в большей мере наследуют структурные переходы в системе железо – углерод, о чем свидетельствуют полученные результаты.

Выводы. Изучена металлическая часть шлакового расплава в виде корольков на двух тех-

нологических этапах продувки плавки (первая повалка и в конце продувки) при работе 160-т конвертеров.

Показано, что в варианте с использованием низковольтного потенциала содержание корольков в шлаке ниже, а характер влияния потенциала определяется знаком полярности. Так, подвод отрицательной полярности потенциала к фурме в наибольшей степени снижает количество корольков, повышая при этом долю крупных капель, способных вернуться в металл.

Анализ результатов фракционного состава корольков подтверждает наличие различных механизмов их поступления в шлак: газодинамического разбрызгивания кислородной струей с образованием крупных капель и дробления металлической поверхности пленки при всплывании пузырьков СО с образованием мелких капель.

Установлено, что при концентрациях углерода в конвертерной ванне 0,25 %, 0,50 и 0,80 % масс. интенсивность окисления углерода в корольках больше или меньше по сравнению с интенсивностью обезуглероживания сталеплавильной ванны, что, вероятно, связано со структурными изменениями, происходящими в металлической матрице по мере снижения содержания углерода.

Результаты исследований поведения корольков в шлаке при кислородном конвертировании могут быть основой создания эффективных вариантов выплавки стали, позволяющих минимизировать потери металла с корольками в шлаке.

Библиографический список / References

1. Бойченко Б. М. Конвертерное производство стали / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин. – Днепропетровск: РВА «Днепро-ВАЛ», 2006. – 453 с.
Boychenko B. M., Ohotskiy V. B., Harlashin P. S. (2006). *Konverternoe proizvodstvo stali* [BOF steel production], Dnepropetrovsk, Dnepro-VAL, 453 p.
2. Охотский В. Б. Термо- и гидродинамические критические концентрации углерода при продувке сталеплавильной ванны / В. Б. Охотский // Известия ВУЗов. ЧМ. – 2006. – № 10. – С. 15–19.
Ohotskiy V. B. (2006). *Termo- i gidrodinamicheskiye kriticheskiye kontsentratsiiy ugleroda pri produvke staleplavilnoy vann* [Thermal and hydrodynamic critical carbon concentration at the steel bath blowing]. *Izvestiya VUZov. CHM*, no. 10, pp. 15–19.
3. Лухтура Ф. И. О критической концентрации углерода в расплаве конвертера / Ф. И. Лухтура // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 24. – С. 49–56.

Luhtura F. I. (2012). *O kriticheckoy kontsentratsii ugleroda v rasplave konvertera* [On the critical carbon concentration of the melt in the converter]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*, no. 24, pp. 49-56.

4. Филиппов С. И. Теория критических концентраций / С. И. Филиппов // Физико-химические основы процессов производства стали. – М.: Наука, 1979. – С. 79–87.

Filippov S. I. (1979). *Teoriya kriticheskikh kontsentratsiy* [The theory of critical concentrations] *Fiziko-himicheskiye osnovy protsessov proizvodstva stali* [Physical and chemical bases of production processes of steel]. Moscow, Nauka, pp. 79-87.

5. Сущенко А. В. Совершенствование дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров на основе исследования процессов в реакционной зоне: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / А. В. Сущенко; Приаз. гос. техн. ун-т. – Мариуполь, 2002. – 202 с.

Suschenko A. V. (2002). *Sovershenstvovaniye dutevikh rezhimov I ustroystv kislorodnykh konverterov na osnove issledovaniya protsessov v reaktsionnoy zone* [Improving the conditions and blowing BOF devices based on the study of processes in the reaction zone], PhD thesis, Mariupol. 202 p.

6. Семькина Т. С. Влияние полярности налагаемого на конвертерную ванну электрического потенциала на состояние и химический состав шлакового расплава / Т. С. Семькина, С. И. Семькин // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2008. – Вып. 15. – С. 125–129.

Semykina T. S. and Semykin S. I. (2008). *Vliyaniye polarnosti nalagaemogo na konverternyuyu vannu elektricheskogo potentsiala na sostoyaniye I himicheskiy sostav shlakovogo raspava* [Influence of polarity of imposed on converting a bath of the electric potential on the state and the chemical composition of molten slag]. *Fundamentalnye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii*, no. 15, pp. 125-129.

7. Семькин С. И. Исследование особенностей влияния низковольтного потенциала на процессы рафинирования металла в кислородном конвертере / С. И. Семькин, Т. С. Кияшко, Е. В. Семькина // Металл и литье Украины. – 2011. – № 7. – С. 29–33.

Semykin S. I., Kiyashko T. S., Semykina E. V. (2011). *Issledovaniye osobennostey vliyaniya nizkovoltnogo potentsiala na protsessi rafinirovaniya metal-la v kislorodnom konvertere* [Research of features of influence of the low voltage potential on the metal refining process in the basic oxygen furnace]. *Metall i lit'ye Ukrainy*, no. 7, pp. 29-33.

8. Квитко М. П. Кислородно-конвертерный процесс / М. П. Квитко, С. Г. Афанасьев. – М.: Металлургия, 1974. – 343 с.

Kvitko M. P., Afanasev S. G. (1974). *Kislorodno-konvertorny process* [LD process], Moscow, Metallurgiya. 343 p.

9. Семькин С. И. Особенности воздействия низковольтного потенциала на металлическую фазу в шлаке, формируемом при внепечной обработке чугуна гранулированным магнием / С. И. Семькин, Т. С. Голуб, Е. В. Семькина // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 6. – С. 2–6.

Semykin S. I., Golub T. S., Semykina E. V. (2015). *Osobennosti vozdeystviya nizkovoltnogo potentsiala na metallicheskiy fazu v shlake, formiruyemom pri vnepechnoy obrabotke chuguna granulirovannim magniyem* [Features of the low voltage potential effect on the metallic phase in the slag being formed during out of furnace hot iron treatment with granulated magnesium]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promishlennost*, no. 6, pp. 2-6.

Purpose. Study of features of metallic phase forming in the slag during the blowing of the metal in converter, including conditions of low voltage electric potential imposition.

Methodology. Industrial experiments in 160-t converters, sampling of metal and slag at technological periods of heat, analysis of fractional and chemical composition of the metal drops in the slag, analytical and graphical evaluation of the results of experiments.

Findings. Analysis of fractional composition of metal drops confirmed the existence of various mechanisms of their admission to the molten slag: by gas-dynamic spraying with jet of oxygen and metal droplets submitted with bubbles of CO. The work shows the positive influence of the low-voltage potential to reduce the number of metal drops in the slag.

Originality. It is shown that negative polarity potential supply to the lance more reduces total amount of metal drops in the slag, while increasing the proportion of large droplets that can back into the metal. It is found that when the carbon content of the molten metal reaches the levels 0.25; 0.5 and 0.8% the ratio of carbon oxidation rates in the range of metal drops and bulk of the steel bath is changed, which is probably due to structural changes in the metal melt.

Practical value. Determined with development of resource-efficient technology options of converter melting on the basis of obtained industrial new scientific and technological results, that allow to minimize the loss of metal with droplets.

Key words: iron-carbon melt, metal drops, carbon behavior, converter process

Рекомендована к публикации
д. т. н. К. Г. Низяевым

Поступила 14.11.2016