

DOI: 10.31319/2519-2884.45.2024.3

УДК 669.184

Голуб Т.С., к.т.н., с.н.с., ORCID: 0000-0001-9269-2953, e-mail: isinasu.golubts@gmail.com

Молчанов Л.С., к.т.н., заввідділом, ORCID: 0000-0001-6139-5956,

e-mail: metall729321@gmail.com

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Golub Tetiana, PhD, senior researcher

Molchanov Lavr, PhD, the head of the department of Physical and technical problems of steel metallurgy

Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine, Dnipro

ТЕРМОДИНАМІЧНА ОЦІНКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ АКТИВІЗАЦІЇ ПРОДУВКИ КИСНЕМ ЗВЕРХУ

У роботі наведено результати термодинамічного аналізу впливу високовольтної активізації кисневого потоку на перебіг реакції окислення вуглецю газоподібною складовою до СО. Розрахунок вільної енергії Гіббса проведено для умов окислювально-відновних реакцій з урахуванням електродних потенціалів складових. Встановлено, що високовольтна активізація кисню на виході з сопла створює таку кількість активних часток — іонів, що на відстані 40 калібрів діаметра сопла їх додаткова кількість сприяє значному підвищенню електродного потенціалу кисню у 1,1 рази.

Ключові слова: продувка киснем; високовольтна активізація; сталеплавильна ванна; йонний обмін; вільна енергія Гіббса; електродний потенціал.

The paper presents the results of a thermodynamic analysis of the effect of high-voltage activation of the oxygen flow on the course of the carbon oxidation reaction by the gaseous component to CO. Gibbs free energy was calculated for the conditions of redox reactions taking into account the electrode potentials of the components. It was established that the high-voltage activation of oxygen at the exit from the nozzle creates such a number of active particles - ions, that at a distance of 40 calibers of the diameter of the nozzle, their additional amount contributes to a significant increase in the electrode potential of oxygen by 1.1 times.

Keywords: oxygen blowing; high-voltage activation; steel melting bath; ion exchange; Gibbs free energy; electrode potential.

Постановка проблеми

Основне положення сталеплавильного переділу у системі металургійного виробництва та висока частка конвертерного металу значною мірою визначають витрати на виробництво металопродукції та конкурентні можливості вітчизняних металургійних підприємств. Це обумовлює необхідність здійснення постійного покращення ефективності роботи сталеплавильних агрегатів.

У світовій практиці все частіше звертаються до інноваційних методів інтенсифікації процесів виробництва сталі, які розширюють можливості існуючих процесів і не вимагають значних капіталовкладень і кардинальних змін в циклі виробництва. У зв'язку з цим, актуальним є проведення досліджень з вивчення способів фізико-хімічного впливу на залізобуглецевий розплав електрично активізованими газовими струменями. Попередня активізація кисневого потоку з утворенням іонів кисню, які є більш хімічно активними, ніж молекули, має сприяти підвищенню ступеня засвоєння продувального газу розплавом з відповідною інтенсифікацією обмінних процесів у конвертерній ванні, що повинно відобразитися, перш за все, на підвищенні продуктивності кисневих конвертерів в результаті скорочення тривалості продувки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомо, що для ефективного управління конвертерною плавкою в киснево-конвертерному процесі необхідно одночасно створювати умови для швидкого окислення вуглецю, інтенсивного перемішування ванни, підвищення ступеня засвоєння кисню та ін., для яких потрібна «жорстка» продувка, а для прискореного та сталого шлакоутворення, збільшення ступеня окислення вуглецю до CO_2 та ін. потрібна «м'яка» продувка ванни. При цьому покращення одночасно обох напрямів у існуючих на більшості металургійних підприємств умовах відсутності стабільності вихідних параметрів плавки, таких як температура футеровки, геометрія робочого простору агрегату, якість металевого брухту, температура і склад чавуну при роботі з регламентованою витратою кисню та з використанням класичної багатосоплової фурми є досить складною задачею [1—3]. У ефективність здійснення процесу виплавки найбільш вагомий влад чинять обмінні процеси (маси, тепла тощо). Основні шляхи впливу на обмінні процеси в сталеплавильній ванні представлені на схемі (рис. 1). Традиційні технологічні прийоми у своїй більшості вже вичерпали ефективні можливості. Вміст кисню у дутті визначається чистотою технічного газу, що виробляє підприємство. Питома витрата кисню, що визначається співвідношенням чавуну і сталевих брухту та відповідно кількістю домішок, які потрібно окислити за час продувки, змінюється у визначених межах 100—120 м³/т сталі, зростаючи зі збільшенням вмісту домішок в шихті.

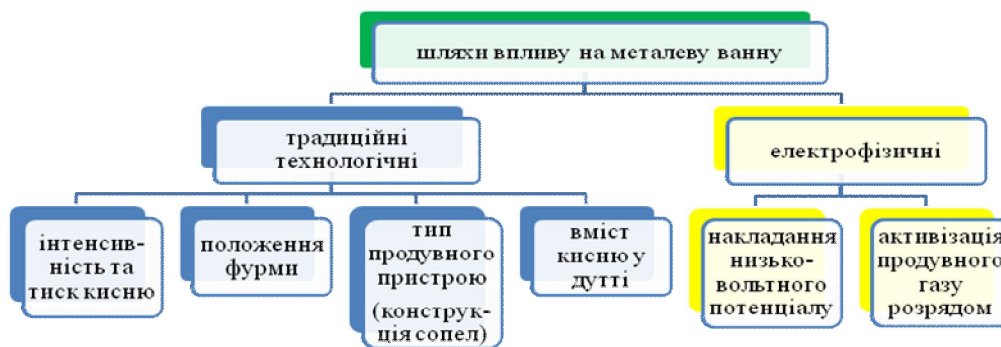


Рис. 1. Схема класифікації впливу на металеву ванну кисневого конвертера

Інтенсивність продування киснем залежить від ємності конвертера і зазвичай є постійною для умов того чи іншого конвертерного цеха. Для підвищення активності перемішування ванни та зменшення тривалості плавки інтенсивність продування прагнуть збільшити, проте досвід показав, що після перевищення певного допустимого рівня інтенсивності продування починаються викиди металу та шлаку з конвертер [4—7]. Положення фурми над рівнем спокійної ванни є параметром, зміною якого в основному і регулюють режим взаємодії дуття і металеві ванни відповідно до необхідності, що виникає протягом кожної плавки. Висота розташування фурми має також встановлені оптимальні межі. У конвертерах різної місткості фурму встановлюють на висоті, що відповідає відстані до рівня ванни в спокійному стані від 0,8 до 4,8 м. У цих межах висота зазвичай зростає зі збільшенням місткості конвертера [8—9]. Невеликі відстані від фурми до рівня ванни обумовлюють дуже інтенсивне надходження кисню в метал, при надмірно низькому положенні («жорстка» продувка) посилюється винос крапель металу газами, що відходять, і абразивний знос головки фурми краплями металу, істотно сповільнюється шлакоутворення. Чим вище розташовується фурма над рівнем ванни, тим більше насичується шлак закисом заліза. При надмірно високому положенні фурми кисневі струмені не занурюються в метал (поверхнєве обдування) і ступінь засвоєння кисню є відповідно низькою. Крім того підвищується зношування футеровки агрегату у верхній частині. У зоні контакту кисню, що подається, з рідкою ванною розвивається температура 2500—2800 °С. Таким чином, положення кисневої фурми щодо рівня спокійного металу істотно впливає на всі параметри конвертерної плавки, що в кінцевому підсумку позначається на технологічних показниках плавки [8, 10].

Дійсна відстань від фурми до ванни по ходу продувки змінюється внаслідок спінивання металу і шлаку, зносу вогнетривкої футеровки, добавки сипких матеріалів, повноти розчинення металевого брухту тощо. Найчастіше зміна положення фурми за ходом продувки має чітко встановлений графік, який не змінюється при наявних відхиленнях стану ванни від плавки до плавки, тому не завжди вирішує поставлене питання ефективності обмінних процесів.

Іншим з поширених шляхів впливу є конструкція продувної фурми та сопел, якими вона оснащена, що може вирішувати як задача інтенсифікації та підвищення ефективності всіх процесів в сталеплавильному агрегаті, так і вирішувати додаткові завдання, наприклад, допалювання відхідних газів [11—14]. При всій перспективності зазначеного напрямку він також має свої обмеження щодо можливостей інтенсифікації обмінних процесів, які пов'язані з описаними вище обмеженнями положень фурми та витратних показників для продувного газу.

Іншим шляхом впливу на обмінні процеси в металургійному агрегаті є стимулювання фізико-хімічних процесів шляхом накладання низьковольтних електричних полів на ванну [15—17] або високовольтних на газовий струмінь [18].

Формулювання мети дослідження

Метою проведеного дослідження стало аналітичне визначення ефективності впливу високовольтного розряду на продувний газ перед його потраплянням в рідкий розплав на обмінні процеси шляхом оцінки зміни термодинамічного показника можливості протікання хімічних реакції — вільної енергії Гіббса [19—20].

Викладання основного матеріалу

Для аналізу був обраний запропонований авторами [18] спосіб іонізації кисневого газового потоку високовольтним розрядом на виході з продувної фурми для верхньої продувки в кисневих конвертерах, який відрізняється простотою реалізації та експлуатації обладнання, можливістю широкого регулювання параметрів іонізації потоку газу, енергетичною ефективністю процесу, стабільністю та надійністю в роботі. Основою запропонованого способу є активізація кисневого потоку шляхом подачі високовольтного розряду (25—30 кВ з частотою 150—300 Гц) на розташований в фурмі ізольований електрод.

Окислювально-відновні реакції у сталеплавильних агрегатах відбуваються за участю заряджених часток — іонів, які формуються як у металевому розплаві завдяки взаємному впливу різних за електронегативністю елементів, так і у шлаковому розплаві через дисоціацію утворених складних та комплексних сполук [21—23]. Наявність іонного стану є також і в газовій фазі завдяки високим температурам, що супроводжують сталеплавильні процеси та спричиняють термічну дисоціацію [24, 25]. Особливо це стосується так званої реакційної зони, де температури найвищі. Такі реакції супроводжуються обміном електронами між хімічними елементами. Тобто у газо-шлако-металевій системі, що взаємодіє між собою, завдяки руху заряджених часток, відбувається їх накопичення на межах розділу, внаслідок чого формується подвійний електричний шар і виникає різниця потенціалів між фазами, яку можна виміряти дослідним шляхом відповідно до робіт [26, 27]. Тобто протікання окислювально-відновних реакцій можна представити як гальванічний елемент, де у якості обкладинок виступають різні фази — учасники, а в конкретному випадку однієї хімічної реакції — окремі йони.

Вільна енергія Гіббса окислювально-відновних реакцій [28]:

$$\Delta G = -n \cdot E \cdot F < 0, \quad (1)$$

де n — число електронів, які беруть участь в процесі; F — постійна Фарадея ($9,65 \cdot 10^7$ Кл/кекв); E — ЕРС «гальванічного елемента» (В).

ЕРС «гальванічного елемента» для протікання реакції в прямому напрямі повинна бути позитивною:

$$E = E_o - E_e > 0, \quad (2)$$

де $E_{o/v}$ — електродні потенціали окисника або відновника (В):

$$E_{o/e} = E_{o/e}^0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln a_{o/e}, \quad (3)$$

де $E_{o/v}^0$ — нормальний потенціал елемента, що є окисником («о») або відновником («в») (приймається потенціал елемента, коли активність його йонів у розчині дорівнює 1); R — універса-

льна газова стала ($8,314 \cdot 10^3$ Дж/моль К); T — абсолютна температура (К); a — активність йонів окисника («о») або відновника («в»).

Тобто для вільного протікання реакції необхідно, щоб електродний потенціал окисника був більшим за електродний потенціал відновника. За умов участі газової фази потенціал буде залежати ще й від парціального тиску газу. Наприклад, для реакції окислення вуглецю, яка є основною при виробництві рідкого напівпродукту у кисневих конвертерах, й ефективність перебігу якої, загалом, визначає час самого процесу конвертування:

$$C^0 + \frac{1}{2} O_2^0 = C^{+2} O^{-2}, \quad (4)$$

$\frac{1}{2} O_2 = O^{-2} - 2e$ процес відновлення (кисень окисник) з електродним потенціалом у газовому середовищі — 0,13В;

$C = C^{+2} + 2e$ процес окислення (вуглець відновник) з електродним потенціалом 0,207 В.

Газ СО не ділиться на іони, а утворює окрему стабільну фазу, тому загальні вирази для електродних потенціалів кисню та вуглецю мають вигляд:

$$E_{O_2} = E_{O_2}^0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \ln \frac{\sqrt{P_{O_2}^0 P_{CO}}}{\sqrt{P_{O_2}}}; \quad (5)$$

$$E_C = E_C^0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \ln P_{CO}, \quad (6)$$

де $P_{O_2}^0$ — стандартний парціальний тиск кисню ($1,01 \cdot 10^5$ Па); P_{O_2} — рівноважний тиск (Па).

Електродний потенціал кисню за умов проведення класичного варіанта продувки при температурі 1600 °С складатиме 1,334 еВ. Тоді ЕРС складає 0,157 В, а вільна енергія Гіббса (ΔG) дорівнює — 30,3 МДж.

На активність кисню можна впливати шляхом збільшення частки йонів в газі, що, зокрема, відбувається при електричній активізації розрядом. Для активного протікання реакції окислення вуглецю необхідні позитивні йони кисню, яким «не вистачає» електронів (прийємо з максимальним ступенем іонізації O^{2+}). Тоді реакція та електродний потенціал кисню приймуть наступний вигляд:

$$2C^0 + O^{2+} = 2C^{+2} O^{-2}; \quad (7)$$

$$E_{O^{2+}} = E_{O_2}^0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \ln \frac{P_{CO}^2}{a_{O^{2+}}^*}. \quad (8)$$

Далі активізовані величини помічено *. З рівняння можна зробити висновок, що у випадку електричної активізації кисню електродний потенціал залежатиме від активності йонів.

Щоб знайти кількість йонів, які утворюються в результаті іонізації кисню електричним розрядом, було використано вимір іонного току за методом Ленгмюра [29]. Вимірювання проведено при активізації технічно чистого кисню електричним розрядом при продуванні з тиском $2 \cdot 10^5$ Па на різній відстані від продувної фурми. Вимірювальна схема [30] включає в себе вимірювальний зонд із площею $2,5 \cdot 10^{-3}$ м², джерело напруги і реєструючий зміну сили струму в ланцюзі гальванометр. Усереднені результати вимірювання наведені на рис. 2. За отриманими результатами вимірювання можна зробити висновок, що максимальна іонізація кисню відбувається на виході з фурми, де створюється високовольтний розряд. Далі на ближній відстані йде спад активних часток й з відстані приблизно 25 калібрів йонний струм має постійне значення.

Для розрахунку було обрано максимально віддалений від продувної фурми вимір — 40 калібрів, що відповідає робочому положенню фурми в промислових умовах, для якого сила йонного струму складала 100 мкА. Відомо, що сила струму це кількість заряду, який перенесено за одиницю часу:

$$I = \frac{q}{t}, \quad (9)$$

де q — кількість заряду (е), t — час (с).

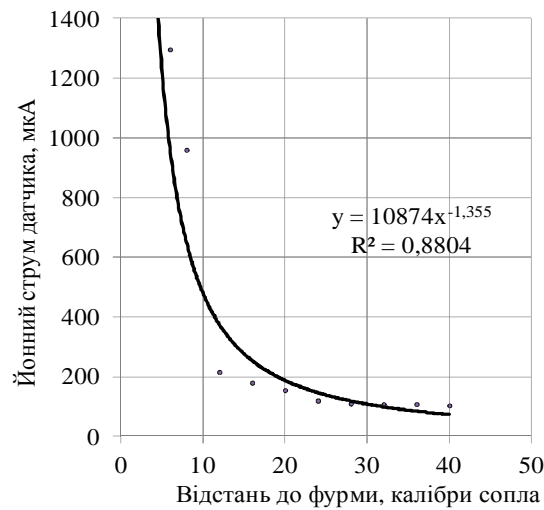


Рис. 2. Результати вимірювання йонного струму при активізації потоку кисню на різній відстані від фурми

Кожної секунди при силі струму 100 мкА буде проходити 100 мкКл. Слід відзначити, що це кількість заряду, що пройшла через площу $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ (при товщині менше $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ відповідно прийємо об'єм $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$). Розрахунок ми проводимо для 1 м^3 газу, тому кількість заряду відповідно складатиме 40 Кл за 1 секунду. Відповідно до закону Фарадея маса заряду складатиме:

$$m^* = \frac{M \cdot q}{F \cdot z} \quad (10)$$

Для йонів кисню, які утворюються при активізації за 1 секунду, m^* складатиме $33 \cdot 10^{-7} \text{ г}$. Відповідно їх молярна концентрація складатиме $2,06 \cdot 10^{-7} \text{ моль/м}^3$. Це йони, які додатково утворюються під дією розряду.

Загалом, активність іонів кисню залежить від наступних параметрів [28]:

$$a_{\text{O}^{2+}} = C_{\text{O}^{2+}} \cdot \gamma_{\text{O}^{2+}}, \quad (11)$$

де $C_{\text{O}^{2+}}$ — молярна концентрація йонів кисню, (моль/м³); $\gamma_{\text{O}^{2+}}$ — коефіцієнт активності йонів кисню.

Для розбавлених розчинів у зв'язку з невеликою кількістю йонів кисню відносно основної складової металевої фази активність іонів можна знайти за формулою [28]:

$$\lg \gamma = -\frac{k \cdot z^2 \sqrt{I}}{T^{3/2}}, \quad (12)$$

де z — заряд іона; I — йонна сила розчину (моль/м³); k — коефіцієнт, який залежить від електромагнітних властивостей середовища.

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i \cdot z_i^2, \quad (13)$$

де C_i — молярна концентрація йонів, (моль/м³).

Відповідно, коефіцієнт активності йонів кисню складає $\gamma^* = 0,97$, а активність $a^* = 1,998 \cdot 10^{-7}$.

Підставивши отриману активність в рівняння (8) отримаємо електродний потенціал кисню 1,46 В, тобто електродний потенціал кисню підвищується у 1,1 рази. Разом з цим ЕРС процесу складає 0,28 В, а вільна енергія Гіббса складатиме — 108,1 МДж, що підвищує вірогідність протікання цієї реакції за показником енергії Гіббса приблизно у 3,6 рази при порівнянні з умовами класичного процесу. Відповідно за отриманими результатами можна очікувати більш активне протікання реакції окислення вуглецю за рахунок взаємодії з газовою фазою й скорочення тривалості продувки за цим елементом.

Висновки

У роботі відображено результати проведеного термодинамічного дослідження впливу активізації кисневого газового потоку високовольтним електричним розрядом на прикладі реакції окислення вуглецю. Останній обрано, як основний компонент залізо–вуглецевого розплаву, за яким визначають час перебігу процесу кисневого конвертування. Було встановлено, що активізація кисню електричним розрядом з утворенням додаткової кількості йонів підвищує електродний потенціал кисню. Це створює умови для підвищення електрорушійної сили окислювально-відновної системи «вуглець – кисень» та, відповідно, збільшення негативної величини вільної енергії Гіббса. Такий висновок свідчить про можливість вільного перебігу реакції між газоподібним активізованим киснем та розчиненим у металевому розплаві вуглецем у напрямку утворення CO.

При порівнянні з класичним варіантом продувки встановлено, що активізація високовольтним розрядом підвищує показник вільної енергії Гіббса у 3,6 рази.

Отримані результати свідчать про відповідну можливість скорочення часу продувки металевого розплаву для досягнення необхідного вмісту вуглецю, завдяки більш активному перебігу реакції зі збільшеною кількістю йонів кисню.

Список використаної літератури

1. Зражевский А.Д., Чернятевич А.Г., Сущенко А.В., Гриценко А.С. Состояние и дальнейшее совершенствование конструкций кислородных фурм в конвертерных цехах Украины. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2014. № 6. С. 20–30.
2. Сущенко А.В. Совершенствование и оптимизация дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров. *Вісник Приазовського державного технічного університету*, 2009. вип. 19. С. 36–41.
3. Охотский В.Б., Молчанов Л.С., Зражевский А.Д. Динамика расхода сталеплавильной шихты. *Технология. Metallургическая и горнорудная промышленность*, 2015. № 4. С. 16–24.
4. Wang Z., Liu H., Wei S., Liu Q., Lu X. Effect of blowing parameters on bath mixing efficiency during basic oxygen furnace steelmaking process. *Engineering Reports*. 2021. vol. 3. P. 1–10.
5. Asahara N., Naito K., Kitagawa I., Matsuo M., Kumakura M., Iwasaki M. Fundamental study on interaction between top blown jet and liquid Bath. *Steel Research International*, 2011. vol. 82. P. 587–594.
6. Cao L.L., Liu Q., Wang Z., Li N. Interaction behaviour between top blown jet and molten steel during BOF steelmaking process. *Ironmaking and Steelmaking*, 2018. vol. 45. P. 39–248.
7. Chou J.M., Chuang M.C., Yeh M.H. Effects of process conditions on mixing between molten iron and slag in smelting reduction vessel via water model study. *Ironmaking and Steelmaking*, 2003. vol. 30. P. 195–202.
8. Lima W., Maia B.T. BOF lance and functions. Conference proceedings of AISTech 2022, Pittsburgh. P. 480–493.
9. Li Z.-Z., Zhu R., Liu R.-Z., Lü M. Effect of oxygen lance position on the flow velocity of molten steel in BOF. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2014. vol. 36. P. 15–20.
10. Богушевский В.С., Грабовский Г.Г., Церковницкий Н.С., Ушаков В.А. Система управления конвертерной плавкой. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2007. № 4. С. 232–235.
11. Чернятевич А.Г., Вакульчук В.В., Молчанов Л.С., Юшкевич П.О., Сигарев Е.Н., Чубин К.И., Чубина Е.А. Высокотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны с использованием двухъярусной кислородной фурмы. *Теория и практика металлургии*, 2017. № 3–4. С. 79–85.
12. Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Юшкевич П.О. Высокотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны с применением трехъярусной фурмы. *Металл и литье Украины*, 2017. № 6–7 (289–290). С. 6–7.
13. Rymarchyk N.M. and Barbus J.A. The post combustion lance: theory and application in the BOF steelmaking process. 12th IAS Steelmaking seminar. 1999. ISS Argentina.

14. Lytvyniuk Y., van den Berg B., Skorians M., Corus D. Increased scrap utilization in the converter steelmaking. *Milleniumsteel*, 2023. vol. 7. P. 28–34.
15. Семькин С.И. Влияние низковольтных потенциалов на выход жидкой стали при конвертерном процессе. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2006. № 7. С. 101–105.
16. Семькин С.И., Кияшко Т.С., Семькина Е.В. Исследование особенностей влияния низковольтного потенциала на процессы рафинирования металла в кислородном конвертере. *Металл и литье Украины*, 2011. № 7. С. 29–33.
17. Семькин С.И., Голуб Т.С., Дудченко С.А., Вакульчук В.В. Высокотемпературные исследования особенностей влияния низковольтного потенциала на поведение шлако-металлической ванны при продувке сверху. *Сучасні проблеми металургії*, 2019. т. 22. С. 83–93.
18. Семькин С.И., Голуб Т.С., Прокопенко П.Г. Стендовое исследование особенностей электрофизической активизации газового кислородсодержащего потока. *Сучасні проблеми металургії*, 2019. № 22. С. 94–103.
19. Koukkari P., Penttilä K., Keegel M. Coupled thermodynamic and kinetic models for high-temperature processes. Proceedings of the 10th International IUPAC Conference on High temperature materials chemistry, Part I, Forschungszentrum Julich, 2000. P. 253–256.
20. Lele A.B. & Dutta S.K. Metallurgical thermodynamics kinetics and numericals. S Chand Publishing, 2012. 200 p.
21. Novikov V.K., Spiridonov M.A., Sangalova I.S. Chemical thermodynamics and elements of structure in oxide melts. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008. vol. 98 (1) 012020. P.1–5.
22. Carter P.T., Macfarlane T.G. Thermodynamics of slag. *Journal Iron and Steel Inst.*, 1957. vol. 173. № 1. P. 62–66.
23. Turkdogan E.T. Fundamentals of steelmaking. The institute of materials, London, 1996. 331 p.
24. Noyes A.A. & Wilson H.A. The thermal ionization of gaseous elements at high temperatures: a confirmation of the Saha theory. *Astrophysical Journal*, 1923. vol. 57, P. 20.
25. Turner M. Chapter 2. Physics of cold plasma, in book *Cold plasma in food and agriculture: Fundamentals and applications* by Misra N. N., Schlüter O., Cullen P. J., 2016. P. 17–51.
26. Семькин С.И., Поляков В.Ф., Дудченко С.А., Вакульчук В.В. Изучение электрических характеристик, снимаемых в конвертере с участка «фурма – ванна», на холодной модели продувки металла сверху. *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии: Сб. научных трудов*, 2009. вып. 20. С. 86–91.
27. Golub T.S. and Semykin S.I. Investigation of electric potential difference during the top oxygen blowing in converter. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2018. vol. 88 (1). P. 35–40.
28. Atkins P., de Paula J. and Keeler J. *Physical Chemistry*. 12 edition. Oxford University press, 2022. 976 p.
29. Borgohain B.; Bailung H. Sheath characteristics in a magnetically filtered low density low temperature multicomponent plasma with negative ions. *Physics of Plasmas*, 2019. vol. 26. iss.12. P. 123511 – 1–123511– 7.
30. Голуб Т.С., Молчанов Л.С., Семькин С.И. Дослідження та оцінка способу активізації газового потоку для здійснення легування газоподібним нітрогеном. *Збірник наукових праць ДДТУ*, 2023. № 2 (43). С. 18–27.

THERMODYNAMIC ASSESSMENT OF ELECTRICAL ACTIVATION OF TOP OXYGEN BLOWING

The current state of the steelmaking industry shows that the oxygen-converter method of obtaining a liquid metal semi-product remains the only economically profitable method. However, the very method for maintaining competitiveness in the market requires constant improvement of production efficiency and cost reduction. Traditional ways of influencing the steel melting bath to improve exchange processes have a number of limitations and have already exhausted their possibilities in most cases. Therefore, it is important to develop new ways of activating the steelmaking exchange

processes, for example, activating the oxygen gas stream with an electric discharge before it is immersed in the metal melt. In the work, a thermodynamic analysis of the effect of high-voltage activation of the oxygen flow on the course of the carbon oxidation reaction by the gaseous component to CO was carried out. This component is decisive for the time of the oxygen convertering process under top-blowing conditions. The Gibbs free energy was chosen as the determining parameter that makes it possible to assess the possibility of free flow of chemical reactions in the direction of product formation. Gibbs free energy was calculated for the conditions of redox reactions taking into account the electrode potentials of the components. It was established that the high-voltage activation of oxygen at the exit from the nozzle creates such a number of active particles — ions that at a distance of 40 calibers of the diameter of the nozzle, their additional amount contributes to a significant increase in the electrode potential of oxygen by 1.1 times. This increases the emf of the “carbon-oxygen” system and is reflected in an increase in the negativity of the Gibbs free energy compared to the classic blowing option in 3.6 times. The obtained results indicate the possibility of reducing the time of blowing the metal melt to achieve the required carbon content earlier due to a more active reaction with an increased number of oxygen ions.

References

- [1] Zrazhevskij A.D., Cherniatevich A.G., Sushenko A.V., Gricenko A.S. (2014) Sostoianie i dalnejshie sovershenstvovanie konstrukcii kislorodnyh furn v konverternyh cegah Ukrainy [*State and further improvement of the structures of oxygen lances in the converter workshops of Ukraine*]. Metallurgical and mining industry. vol. 6. P. 20–30. [in Russian].
- [2] Sushenko A.V. (2009) Sovershenstvovanie i optimizacia dutevyh rezhumov i ustrojstv kislorodnyh konverterov [*Improvement and optimization of blast modes and devices of oxygen converters*]. Bulletin of the Azov State Technical University. vol. 19. P. 36–41 [in Russian].
- [3] Ohotskij V.B., Molchanov L.S., Zrazhevskij A.D. (2015) Dinamika rashoda staleplavilnoj shihty. Tehnologija [*Dynamics of steelmaking charge consumption. Technology*]. Metallurgical and mining industry. vol. 4. P. 16–24 [in Russian].
- [4] Wang Z., Liu H., Wei S., Liu Q., Lu X. (2021) Effect of blowing parameters on bath mixing efficiency during basic oxygen furnace steelmaking process. Engineering Reports. vol. 3. P. 1–10.
- [5] Asahara N., Naito K., Kitagawa I., Matsuo M., Kumakura M., Iwasaki M. (2011) Fundamental study on interaction between top blown jet and liquid Bath. Steel Research International. vol. 82. P. 587–594.
- [6] Cao L.L., Liu Q., Wang Z., Li N. (2018) Interaction behaviour between top blown jet and molten steel during BOF steelmaking process. Ironmaking and Steelmaking. vol. 45. P. 39–248.
- [7] Chou J.M., Chuang M.C., Yeh M.H. (2003) Effects of process conditions on mixing between molten iron and slag in smelting reduction vessel via water model study. Ironmaking and Steelmaking. vol. 30. P.195–202.
- [8] Lima W., Maia B.T. (2022) BOF Lance and functions. Conference proceedings of AISTech 2022, Pittsburgh. P. 480–493.
- [9] Li Z.-Z., Zhu R., Liu R.-Z., Lü M. (2014) Effect of oxygen lance position on the flow velocity of molten steel in BOF. Journal of University of Science and Technology Beijing. vol. 36. P. 15–20.
- [10] Bogushevskij V.S., Grabovskij G.G, Cerkovnickij N.S., Ushakov V.A. (2007) Sistema upravleniia konverternoj plavkoj. [*Converter melting control system*]. Metallurgical and mining industry. vol. 4. P 232–235. [in Russian].
- [11] Cherniatevych A.G., Vakulchuk V.V., Molchanov L.S., Yushkevich P.O., Sigarev Ye.N., Chubin K. I., Chubina Ye. A. (2017) Vysokotemperaturnoe modelirovanie produvki konverternoj vannы s ispolzovaniem dvuhjarusnoj kislorodnoj furnы [*High-temperature modeling of converter bath blowing using a two-tier oxygen tuyere*]. Theory and practice of metallurgy. vol. 3—4. P. 79–85. [in Russian].
- [12] Cherniatevych A.G., Molchanov L.S., Yushkevich P.O. (2017) Vysokotemperaturnoe modelirovanie produvki konverternoj vannы s primeneniem trehjarusnoj furnы [*High-temperature modeling of converter bath blowdown using a three-level lance*]. Metal and casting of Ukraine. vol. 6–7 (289–290). P. 6–7. [in Russian].

- [13] Rymarchyk N.M., Barbus J.A. (1999) The post combustion lance: theory and application in the BOF steelmaking process. 12th IAS Steelmaking seminar. ISS Argentina.
- [14] Lytvyniuk Y., van den Berg B., Skorians M., Corus D. (2023) Increased scrap utilization in the converter steelmaking. *Milleniumsteel*. vol. 7. P. 28–34.
- [15] Semykin S.I. (2006) Vlijanie nizkovoltnyh potencialov na vyhod zhidkoj stali pri konvertornom processe [*Effect of Low Voltage Potentials on Liquid Steel Yield in Converter Process*]. *Metallurgical and Mining Industry*. vol. 7. P. 101–105. [in Russian].
- [16] Semykin S. I., Kiiashko T. S., Semykina Ye. V. (2011) Issledovanie osobennostej vlojanja nizkovoltnogo potenciala na process rafinirovaniia metalla v kislorodnom konvertere [*Study of the features of the influence of low-voltage potential on the processes of metal refining in an oxygen converter*]. *Metal and casting of Ukraine*. vol. 7. P. 29–33. [in Russian].
- [17] Semykin S.I., Golub T.S., Dudchenko S.A., Vakulchuk V.V. (2019) Vysokotemperaturnye issledovaniia osobennostej vlojanja nizkovoltnogo potenciala na povadanie shlako-metallicheskoj vanny pri produvke sverhu [*High-temperature studies of the features of the influence of low-voltage potential on the behavior of a slag-metal bath during top blowing*]. *Modern problems of metallurgy*. vol. 22. P. 83–93. [in Russian].
- [18] Semykin S.I., Golub T.S., Prokopenko P.G. (2019) Stendovoe issledovanie osobennostey elektrofizicheskoi aktivizatsii gazovogo kislorodsoderzashogo potoka [*Bench study of the features of electrophysical activation of gas oxygen-containing flow*]. *Modern problems of metallurgy*. vol. 22. P. 94–103. [in Russian].
- [19] Koukkari P., Penttilä K., Keegel M. (2000) Coupled thermodynamic and kinetic models for high-temperature processes. *Proceedings of the 10th International IUPAC Conference on High temperature materials chemistry, Part I, Forschungszentrum Julich*. P. 253–256.
- [20] Lele A.B. & Dutta S.K. (2012) *Metallurgical thermodynamics kinetics and numericals*. S Chand Publishing. 200 p.
- [21] Novikov V.K., Spiridonov M.A., Sangalova I.S. (2008) Chemical thermodynamics and elements of structure in oxide melts. *Journal of Physics: Conference Series* 98 (1) 012020. P.1–5.
- [22] Carter P. T. and Macfarlane T. G. (1957) Thermodynamics of slag. *Journal Iron and Steel Inst.* vol. 173. iss. 1. P. 62–66.
- [23] Turkdogan E.T. (1996) *Fundamentals of Steelmaking*. The Institute of Materials, London, 1996. 331 p.
- [24] Noyes A.A. & Wilson H.A. (1923) The thermal ionization of gaseous elements at high temperatures: a confirmation of the Saha theory. *Astrophysical Journal*. vol. 57. P. 20.
- [25] Turner M. (2016) Chapter 2. Physics of cold plasma, in book *Cold plasma in food and agriculture: Fundamentals and applications* by Misra N. N., Schlüter O., Cullen P. J. P. 17–51.
- [26] Semykin S.I., Poliakov V.F., Dudchenko S.A., Vakulchuk V.V. (2009) Izuchenie elektricheskikh harakteristik, snimaemykh s uchastka “furma-vanna”, na holodnoj modeli produvki metalla sverhu [*Study of electrical characteristics taken in the converter from the “lance – bath” section, on a cold model of top blowing metal*]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. vol. 20. P. 86–91. [in Russian].
- [27] Golub T.S. and Semykin S.I. (2018) Investigation of electric potential difference during the top oxygen blowing in converter. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. vol. 88 (1). P. 35–40.
- [28] Atkins P., de Paula J. and Keeler J. (2022) *Physical Chemistry*. 12 edition. Oxford University press. 976 p.
- [29] Borgohain B.; Bailung H. (2019) Sheath characteristics in a magnetically filtered low density low temperature multicomponent plasma with negative ions. *Physics of plasmas*. vol. 26. iss.12. P. 123511 – 1–123511 – 7.
- [30] Golub T.S., Molchanov L.S., Semykin S.I. (2023) Doslidzhennia ta ocinka sposobu aktyvizatsii gazovogo potoku dlia zdijsnennia leguvannia gazopodibnym nitrogenom [*Research and assessment of the method of gas flow activation for alloying with gaseous nitrogen*]. *Collection of scientific works of DSTU*. vol. 2 (43). P. 18–27[in Russian].