

- al, combining the best properties of agglomerate and pellets]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2018, iss. 36, pp. 7-15. doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142462. (Ukr.)
6. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Kassim D.A., Lyakhova I.A., Chuprinov E.V. Improved Iron-Ore Sinter for Blast Furnaces. *Steel in Translation*, 2015, no. 4, pp. 270-274. doi: 10.3103/s0967091215040154.
 7. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Stupnik N.I., Chuprinov E.V., Lyakhova I.A. Improved Iron-Ore Pellets for Blast Furnaces. *Steel in Translation*, 2016, no. 12, pp. 860-867. doi: 10.3103/S0967091216120135.
 8. Tovarovskiy I.G., Lyalyuk V.P. *Evolyutsiya domennoy plavki* [Blast furnace evolution]. Dnepropetrovsk, Porogi Publ., 2001. 424 p. (Rus.)
 9. Lyalyuk V.P., Tarakanov A.K., Kassim D.A., Kucher I.I. Vozmozhnosti normalizatsii gazo-dinamicheskogo rezhima domennoy plavki pri vduvanii PUT [Possibilities of normalizing the gas-dynamic regime of blast-furnace smelting during pulverized coal injection]. *Stal' – Steel*, 2020, no. 7, pp. 8-12.
 10. Lyalyuk V.P., Tarakanov A.K., Kassim D.A. Opredeleye trayektorii potoka gaza pri vduvanii v domennuyu pech pyleugolnogo topliva [Determination of the gas flow path when pulverized coal fuel is injected into a blast furnace]. *Stal' – Steel*, 2017, no. 4, pp. 2-6. (Rus.)
 11. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Lyakhova I.A., Kassim D.A., Chuprinov E.V. Tekhnologiya polucheniya syrykh okatyshey s zakatannym vnutr tverdym toplivom [Technology of obtaining raw pellets with solid fuel rolled inside]. *Girnichii visnik Krivoriz'kogo natsional'nogo universitetu – Mining journal of Kryvyi Rih National University*, 2014, no. 98, pp. 162-165. (Rus.)

Рецензент О.Д. Учитель
д-р техн. наук, проф., ННТИ ДУЕТ

Стаття надійшла 15.10.2020

УДК 669.184

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226184

© Радько Н.Г.¹, Чупринов Є.В.², Лялюк В.П.³,
Коренко М.Г.⁴, Кривенко В.В.⁵

УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ ПО РОЗРАХУНКОВІЙ ТЕМПЕРАТУРІ РЕАКЦІЙНОЇ ЗОНИ

Отримано новий параметр киснево-конвертерного процесу (температура випромінювання поверхні реакційної зони), що дозволяє здійснювати контроль плавки протягом всієї її тривалості. В основі алгоритму, який розраховує цей параметр, лежить вимір потужності теплового потоку, що отримує охолоджуюча вода.

Ключові слова: виплавка сталі, технологічний процес, випромінювання, реакційна зона, окислення.

¹ ст. викладач, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг

² канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0001-7258-2079, vitalij.lyalyuk@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0002-4582-1756

⁵ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0001-7822-6358

N.G. Rad'ko, E.V. Chuprinov, V.P. Lyalyuk, M.G. Korenko, V.V. Krivenko. Control of the converter melting technological process through the calculated temperature of the reaction zone. The article presents calculations of the current temperature of the metal reaction zone and determines its dependence on time at blowing. It has been shown that changes in the temperature of the reaction zone temperature at melting characterize the processes occurring in the bath of the converter. Analysis of the obtained dependence in real time makes it possible to quickly predict the end of oxidation [Si] and [Mn] and the content of [C] in the melt. Besides, the thermal energy of radiation makes it possible in different periods of melting to forecast and to adjust the amount flow of oxygen injected at melting, the necessity to adjust the position of the oxygen lance relative to the metal, and, what is the most important, to predict the completion of blowing. The automation systems implementing the developed model have been offered. It has been shown that it includes sensors of temperature, water and oxygen flow rate and pressure, lance position, means of communication with ACS TP converter melting, control and workstation control, as well as a set of algorithms and programs. An algorithm for calculating the current temperature of the reaction zone during melting has been developed, the algorithm taking the melt as an energy emitter. It has been established that the temperature of the reaction zone reflects through its change in different periods of melting the technological processes in the converter: the temperature of the steel melt, the intensity of the Fe oxidation in the reaction zone, [Si] and [Mn] oxidation processes, endothermic processes strengthening due to Fe oxides in slag, etc. The presented calculations and proposed possibilities of influencing the gas-blowing mode to reduce the supply of oxygen to the melt make it possible for the technologists to achieve the required reduction of steel oxidation and to reduce the deoxidizer costs when casting steel or to predict the substitution of oxygen for air without impairing bath mixing.

Keywords: steel smelting, technological process, radiation, reaction zone, oxidation.

Постановка проблеми. В даний час технологічний процес закінчення конвертерної плавки коригується сумарною витратою кисню, а також даними, що були отримані при «повалці» конвертера з метою взяття проби металу на вміст вуглецю і виміру його температури. Кількість таких «повалок» конвертера може досягти двох, трьох і більше, що негативно позначається на продуктивності конвертера, призводить до втрати температури металу і шлаку, загушення шлаку та загрожує іншими розладами конвертерної плавки [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досвід промислово розвинених країн, зокрема Японії [2], показує, що потрапляння плавки в задане цільове вікно за хімічним аналізом і температурою відбувається у 99,8% випадках без здійснення «повалок» конвертера і коригуючих «додувок». Розроблені та запропоновані механізми контролю киснево-конвертерної плавки за рахунок вивчення динаміки процесів, що відбуваються у розплаві, потребують вдосконалення та подальших досліджень [3], а особливе місце в дослідженнях цих процесів повинно відводитись вуглецю, як елементу, окиснення котрого є визначальним для масообмінних процесів [4]. Окрім того, застосування сучасної обчислювальної техніки створює передумови для оперативного управління технологічним процесом на базі отримуваних вимірювань [5-7].

Таким чином, впровадження методів контролю та механізмів управління киснево-конвертерним процесом без вартісних капітальних вкладень є важливим та актуальним питанням.

Мета статті – розробка нових методів контролю та управління технологічним процесом киснево-конвертерної плавки на основі температури реакційної зони.

Виклад основного матеріалу. Прогнозувати настання часу закінчення продувки киснем конвертерної плавки і стежити за ходом протікання її основних процесів можливо на підставі розрахунку в реальному масштабі часу (по ходу плавки) температури розплаву (реакційної зони). Температуру розплаву (реакційної зони) нескладно оперативно визначати з рівнянь балансу тепла, що випромінюється півсферою реакційної зони на водоохолоджувану кисневу фурму, і теплоти, відведеної від кисневої фурми водою.

Для розрахунку температури розплаву необхідна вхідна інформація: про температуру води, її витрату і тиск на вході і виході кисневої фурми; температуру, витраті і тиск кисню, що

вдувається. У математичну модель розрахунку температури розплаву вводиться інформація про стан кисневої фурми, вихідну сировину, марку сталі, що виплавляється, а також хімічні аналізи проб металу і прямого виміру температури при «повалці» конвертера.

За допомогою математичної моделі розраховується поточна температура (по ходу плавки) реакційної зони ($T_{p.з.}$) металу і будується залежність $T_{p.з.}$ від часу. Зміни температури реакційної зони по ходу плавки характеризують процеси, що протікають у ванні конвертера. Аналіз отриманої залежності в реальному масштабі часу дозволяє оперативно прогнозувати закінчення окислення [Si] і [Mn], вміст [C] в розплаві. Крім цього по тепловій енергії випромінювання в різні періоди плавки здійснюється прогноз на коригування витрати кисню, що вдувається по ходу плавки, необхідність регулювання положення кисневої фурми щодо металу, а також, що найважливіше, можна з високим ступенем вірогідності прогнозувати закінчення продувки.

До складу технологічних засобів системи автоматизації, що реалізують розроблену модель, входять датчики температури, витрати і тиску води та кисню, положення фурми, засоби зв'язку з АСУ ТП конверторної плавки, контроль і АРМ управління, а також комплекс алгоритмів і програм. Алгоритм розрахунку поточної температури реакційної зони ($T_{p.з.}$) по ходу плавки заснований на розгляді розплаву як випромінювача енергії. Так, під час продування розплаву в конвертері технічним киснем через багатосоплову фурму поверхня розплаву сталі представляє собою сферу випромінювання з високою температурою (температурою реакційної зони ($T_{p.з.}$)). Ця температура аналітично пов'язана з температурою металу (T_m).

Потік електромагнітного випромінювання від сфери реакційної зони через простір розжарених газів (коефіцієнт чорноти 0,8-0,9) падає на поверхню водоохолоджуємої фурми (через фурму вдувається технічний кисень, причому витрата, тиск, температура, і вміст O_2 в ньому може змінюватися, а також змінюється і положення фурми в різні періоди плавки).

Енергія випромінювання від поверхні реакційної зони підпорядковується закону Стефана-Больцмана:

$$E = \varepsilon \cdot C \cdot (T/100)^4, \text{ Вт/см}^2, \quad (1)$$

де ε – коефіцієнт чорноти (0,8-0,9); C – коефіцієнт випромінювання абсолютного тіла $5,68 \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{K}^4$; T – температура випромінюючої поверхні, К.

Потужність (P) випромінювання, що падає на кисневу фурму площею поверхні (S_ϕ), буде:

$$P = E \cdot S_\phi = S_\phi \cdot \varepsilon \cdot C \cdot (T/100)^4, \text{ Вт.} \quad (2)$$

Потужність енергії, що набувається водою (P_v), котра охолоджує фурму, від потоку енергії, що випромінюється поверхнею реакційної зони, можна оцінити за формулою:

$$P_v = V \cdot (\rho_2 \cdot h_2 - \rho_1 \cdot h_1), \text{ кВт}, \quad (3)$$

де V – об'єм води, що охолоджує фурму в одиницю часу, м^3 ; ρ_2 – щільність води при температурі T_2 на виході з фурми, кг/м^3 ; ρ_1 – щільність води при температурі T_1 на вході в фурму, кг/м^3 ; h_1 – питома теплоємність води при температурі T_1 на вході в фурму, $\text{Дж/(кг} \cdot \text{°K)}$; h_2 – питома теплоємність води при температурі T_2 на виході з фурми, $\text{Дж/(кг} \cdot \text{°K)}$.

Наведені значення параметрів води обчислюються за даними вимірів температур T_1 і T_2 , тиску і витрати води. Охолоджуючий вплив кисню, що продувається через фурму, враховується коефіцієнтом k_1 , а вплив відстані від фурми до поверхні реакційної зони – коефіцієнтом k_2 (положення фурми). В результаті потужність енергії, що набувається охолоджуючою водою з урахуванням впливу продувки кисню через фурму і її положення щодо поверхні реакційної зони (вимірюється витрата кисню, його тиск і температура, а також відстань фурми до поверхні розплаву) буде:

$$P_v = k_1 \cdot k_2 \cdot V \cdot (\rho_2 \cdot h_2 - \rho_1 \cdot h_1) \cdot 10^3, \text{ Вт.} \quad (4)$$

Потужність потоку, що падає на поверхню фурми, порівнюємо з потужністю одержуваної охолоджуючої фурму водою:

$$P = P_v = S_\phi \cdot \varepsilon \cdot C \cdot (T/100)^4 = k_1 \cdot k_2 \cdot V \cdot (\rho_2 \cdot h_2 - \rho_1 \cdot h_1) \cdot 10^3, \text{ Вт}, \quad (5)$$

звідки

$$(T_{p.з.}/100)^4 = (k_1 \cdot k_2 \cdot V \cdot (\rho_2 \cdot h_2 - \rho_1 \cdot h_1) \cdot 10^3) / S_\phi \cdot \varepsilon \cdot C, \quad (6)$$

тоді температура реакційної зони складе:

$$T_{p.z.} = \sqrt[4]{10^{11} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot V \cdot (\rho_2 \cdot h_2 - \rho_1 \cdot h_1) / S_{\phi} \cdot \varepsilon \cdot C}, K. \quad (8)$$

Таким чином, вимірюючи потужність теплового потоку, що отримується охолоджуючою водою, і виконавши добавку поправочних коефіцієнтів на витрату кисню і положення фурми, можна розрахувати поточну температуру випромінюючої поверхні реакційної зони за допомогою алгоритму, реалізованого на обчислювальній техніці, що дозволяє мати новий параметр процесу протягом всієї тривалості плавки.

Зв'язки $T_{p.z.}$ з технологічними параметрами конвертерної плавки були встановлені в киснево-конвертерному цеху «АрселорМіттал Кривий Ріг». Встановили, що температура реакційної зони $T_{p.z.}$ відображає своєю зміною в різні періоди плавки технологічні процеси в конвертері (рис.).

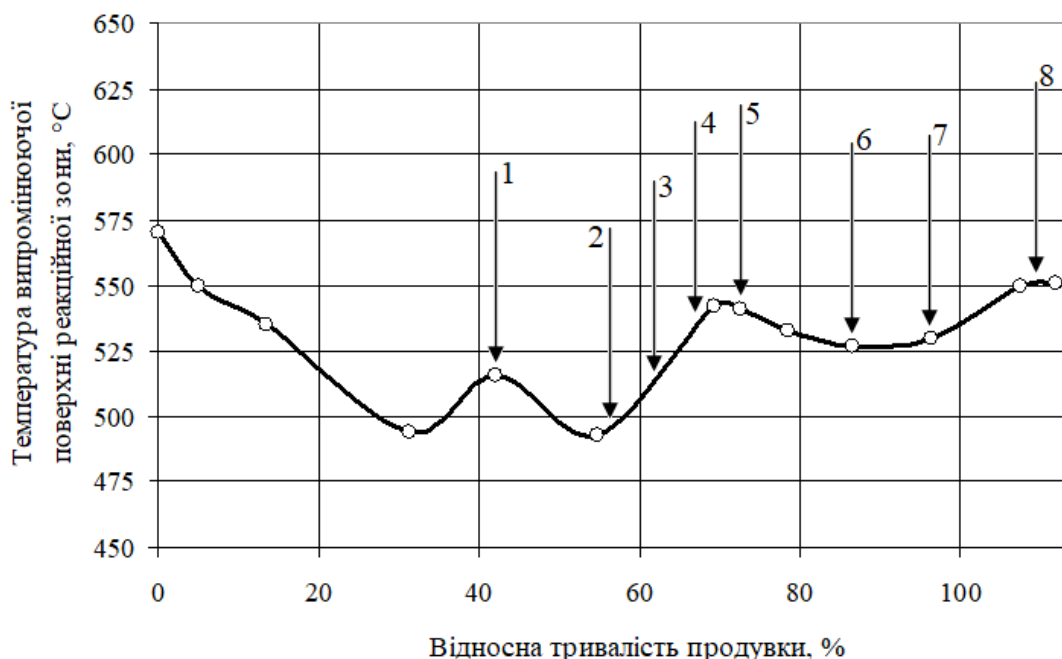


Рисунок – Зміна температури випромінюючої поверхні реакційної зони в різні періоди плавки в конвертері: 1 – інтенсивне окислення Fe при слабкому перемішуванні; 2 – початок активного окислення [Mn], [Si]; 3 – ендотермічні процеси окислів Fe в шлаці; 4 – уповільнення росту температури через активне перемішування ванни; 5 – падіння температури через зменшення вмісту вуглецю в металі; 6 – погіршення перемішування; 7 – зростання температури на 2-3°C в хвилину; 8 – стабілізація температури

Зокрема:

- температуру розплаву сталі T_p і перепаду температур $T = T_{p.z.} - T_p$;
- перший максимум T відображає інтенсивне протікання реакції окислення Fe в реакційній зоні при слабкому тепловідводі через погане перемішування ванни і малу швидкість окислення $[C] - V_c$;
- наступний підйом T пов'язаний з активним окисленням [Si] і [Mn], що окислюються більш активно, ніж [C], причому в міру зниження їх вмісту перегрів ванни слабшає;
- завершення окислення [Si] і [Mn] створює передумови менш активному [C] з'єднуватися з O_2 при сприятливих зовнішніх умовах (висока температура), а також до більш інтенсивного перемішування ванни і відведення теплоти, знижуючи T ;
- після посилення ендотермічних процесів за рахунок окислів Fe в шлаці відбувається новий підйом T ;

– після зниження концентрації $[C]$ його швидкість окислення V_c падає, зменшується перемішування ванни монооксидом вуглецю, що утворюється, і спостерігається зростання $T_{p.з.}$ із темпом $2-3^\circ\text{C}$ в хвилину з остаточною її стабілізацією; далі T_p зростає, а T падає при сталості $T_{p.з.}$;

– перепад температур $T = T_{p.з.} - T_p$ дозволяє прогнозувати зміну вмісту $[C]$ в розплаві, починаючи з його другого максимуму (є експериментальні залежності, які необхідно адаптувати до умов цеху і емпіричні залежності, наприклад: $(T/100)^2 = 10 \cdot (5 + 4[C] - [C]^2)$).

Необхідно відзначити, що після другого максимуму T відбувається накопичення O_2 в розплаві і при окисленні $[C]$ існують періоди, коли кількість утвореного оксиду вуглецю перевищує стехіометрично можливе, виходячи з витрат кисню в ванну, що пояснюється надмірним окисленням розплаву.

Висновки

1. Представлені обчислення та запропоновані можливості впливу на газодуттєвий режим для скорочення подачі кисню в розплав дозволяють технологам досягати необхідних показників зниження окислення сталі і зменшити витрати розкислювачів при розливанні сталі або використовуватися для передбачення заміни частини кисню повітрям, не погіршуючи перемішування ванни.

2. Застосування математичної моделі і системи автоматичного управління плавкою на основі оперативного контролю зміни температура реакційної зони дозволить скоротити час на «повалку» кисневого конвертера при отриманні сталі з заданими характеристиками, а також скоротити тривалість плавки на 2-3 хв (до 4%).

Перелік використаних джерел:

1. Технология производства стали в современных конверторных цехах / С.В. Колпаков, Р.В. Старов, В.В. Смоктий; под ред. С.В. Колпаков. – М. : Машиностроение, 1991. – 463 с.
2. Behavior of jet from top-lance in BOF / K. Naito [et al.] // *ShenNittetsu Giho*. – 2012. – № 394. – Pp. 33-41.
3. Богусhevський В.С. Контроль динаміки ванни по ходу продувки як складова системи керування конвертерною плавкою / В.С. Богусhevський, К.В. Єгоров // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2013. – № 1. – С. 51-56.
4. Богусhevський В.С. Обезуглероживание стали как основной параметр оптимального управления ККП / В.С. Богусhevский, С.Г. Мельник, С.В. Жук // *Металл и литьё Украины*. – 2014. – № 2. – С. 14-16.
5. Компьютерная модель расчета шихтовки и продувки конвертерной плавки / В.С. Богусhevский, Г.Г. Грабовский, В.М. Михайлов [и др.] // *Сталь*. – 2006. – № 1. – С. 18-21.
6. Сущенко А.В. Сравнительный анализ методик расчета материального и теплового балансов кислородно-конвертерной плавки / А.В. Сущенко, И.А. Фейерэizen // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. – 2013. – Вип. 27. – С. 17-28. – (Серія : Технічні науки).
7. Аналіз причин додувок у конвертерному виробництві сталі та шляхи їх усунення / Н.Г. Радько, Є.В. Чупринов, В.П. Лялюк, М.Г. Коренко, В.В. Кривенко // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. – 2020. – Вип. 40. – С. 88-95. – (Серія : Технічні науки). – Режим доступу : [DOI: 10.31498/2225-6733.40.2020.216183](https://doi.org/10.31498/2225-6733.40.2020.216183).

References:

1. Kolpakov S.V., Sarov R.V., Smoktii V.V. *Tehnologiya proizvodstva stali v sovremennykh konvertornykh cehah* [Steel production technology in modern converter shops]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 463 p. (Rus.)
2. Naito K., Asayara N., Kaizawa A., Ogawa Y. Behavior of jet from top-lance in BOF. *Shen-Nittetsu Giho*, 2012, no. 394, pp. 33-41.
3. Bogushevskij V.S., Yegorov K.V. Kontrol dinamiki vannii po hoduu produvki yak skladova sistemi keruvannya konverternoyu plavkoyu [Control of bath dynamics during purge as a component of converter melting control system]. *Naukovi visti Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu Ukraini «Kiivs'kii politekhnichnii institut» – KPI Science News*, 2013, no. 1, pp. 51-56. (Ukr.)
4. Bogushevskij V.S., Melnik S.G., Zhuk S.V. Obезuglerozhivanie stali kak osnovnoy parametru op-

- timalnogo upravleniya KKP [Steel decarburization as the main parameter of optimal control of oxygen-converter smelting]. *Metall i lit'e Ukrainy – Metal and casting of Ukraine*, 2014, no. 2, pp. 14-16. (Rus.)
5. Bogushevskij V.S., Grabovskij G.G., Mihajlov V.M. Kompyuternaya model rascheta shihtovki i produvki konverternoj plavki [Computer model for calculating the charge and purge converter smelting]. *Stal' – Steel*, 2006, no. 1, pp. 18-21. (Rus.)
 6. Sushenko A.V., Fejerejzen I.A. Sravnitelnyj analiz metodik rascheta materialnogo i teplovogo balansov kislorodno-konverternoj plavki [Comparative analysis of methods for calculation of material and thermal balances of oxygen-converter melting]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehnichnogo universitetu. Serija : Tehnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2013, no. 27, pp. 17-28. (Rus.)
 7. Rad'ko N.G., Chuprinov E.V., Lyalyuk V.P., Korenko M.G., Krivenko V.V. Analiz prichin doduvok u konverternomu virobnicztvi stali ta shlyakhi yikh usunennya [Analysis of the causes of additional blowings in converter steel production and ways of their elimination]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Serija: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2020, iss. 40, pp. 88-95. **doi: 10.31498/2225-6733.40.2020.216183.** (Ukr.)

Рецензент: Д.О. Кассім
д-р техн. наук, проф., ННТІ ДУЕТ

Стаття надійшла 13.11.2020