

# МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 669.184.244.66.012.1

В.С. Богушевський, К.М. Зубова, В.Ю. Сухенко

## КЕРУВАННЯ КОНВЕРТЕРНОЮ ПЛАВКОЮ В УМОВАХ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Based on the theoretical justification of carbon oxidization and the analyses of progressing processes of heat generation, we develop the model of temperature condition of the converter frame bath. We analyze the existing methods of controlling the converter process by the energy-saving technology. We also study the influence of the distance lance to the level of quiet metal bath on thermal characteristics. We analyze control methods of the energy-saving technology for the blowing converter by single- and two-circuit lances. We demonstrate the results of industrial testing of the proposed control methods. Finally, we show the dependence of the degree of carbon monoxide after-burning in the converter space on the weighted mean height of the blowing tuyeres during melting. We also demonstrate the influence of tuyere distance to the level of quiet bath on the after-burning process of carbon monoxide in the air chamber of the 350-ton converter.

### Вступ

Нині конвертерний процес є основним способом виробництва сталі. На її якість, вихід корисного металу, шлакоутворення, стійкість футерівки впливає тепловий режим плавлення. Зазвичай найкращі показники якості сталі та зливка отримують після досягнення наприкінці продувки деякої оптимальної температури металу, яка варіюється для різних марок сталі та способів її розливання. Оптимальне перегрівання металу перед випуском відносно температури плавлення коливається від 80 до 150 °С [1, 2].

Відомо, що під час переробки звичайного чавуну приблизно 54–58 % всієї теплоти, що виділяється у ванну в процесі хімічних реакцій, припадає на окиснення вуглецю. Цього цілком достатньо для нагрівання металу й шлаку до потрібної кінцевої температури. Тому за умови теплового балансу можна переробляти будь-який чавун, навіть із гранично низьким вмістом таких елементів, як силіцій, манган і фосфор.

Істотним недоліком киснево-конвертерного процесу є обмежені можливості переробки брухту. Останнім часом дослідники та практики намагаються знайти спосіб введення палива в кисневий конвертер для збільшення частки брухту у металошихті. Враховуючи, що газы, які відходять із конвертера, складаються приблизно із 90 % CO і 10 % CO<sub>2</sub>, а тепловий ефект допалювання CO становить близько 21000 кДж/кг вуглецю [3], великі резерви у зростанні частки брухту криються у збільшенні ступеня допалювання CO у порожнині конвертера. Основним способом вирішення цього завдання є зміна конструкцій фурм і керування режимом введення дуття. Автори праці [4] дійшли висновку, що найкращі результати допалення CO досягаються при застосуванні дво-

контурних фурм. У цьому випадку групою основних сопел внутрішнього ряду при витраті крізь них 85–90 % кисню від загального прагнули організувати розподіл макрооб'ємів CO, що виходять із відокремлених реакційних зон, а зустрічно спрямованими додатковими струменями, які формуються соплами зовнішнього ряду, створити своєрідну завісу на шляху виносу крапель металу при одночасному допалюванні CO до CO<sub>2</sub> з передачею виділеного тепла безпосередньо ванні.

При цьому керування зводилося до стабілізації режиму введення дуття кожного контуру при регульованому двоконтурному підведенні кисню. Зворотний зв'язок із ходом процесу був відсутній, що значно знижувало використання тепла у конвертері від допалювання CO.

Наведені в статті дослідження проводились у НТУУ “КПІ” за темою “Математичні моделі й алгоритми системи управління кисневим конвертером” (державний реєстраційний номер 0110U002880).

### Постановка задачі

Метою досліджень є створення моделі керування температурним режимом ванни конвертера для різних конструкцій фурм на основі теоретичного обґрунтування процесів окиснення вуглецю й аналізів процесів тепловиділення, що проходять при цьому.

### Регулювання процесу при застосуванні одноконтурних фурм

Основний параметр регулювання – дуттєвий режим. Він визначається регламентованими в часі відстанню фурми від рівня спокійної ванни та тиском дуття, а також конструк-

тивними особливостями кінцевика фурми. Ці параметри взаємопов'язані та мають спільний наслідок – глибину проникнення струменя дуття у розплав. У ході дуття для ванни конвертера характерним є регулярна та хвилеподібна зміна параметрів. Гідродинамічний режим дуття має характер розвиненої турбулентності, ускладненої коливальними складниками.

Від відстані фурми залежить ступінь допалювання монооксиду вуглецю у порожнині реторти. Цю залежність було отримано японським дослідником на 85-тонному конвертері заводу фірми "Кавасакі Сейтецу Корпорейшн" у м. Тібе [5]. Досліджено верхню фурму для продувки, у якій лавалевські сопла кінцевика були замінені на циліндричні. Як видно з рис. 1, ефективність допалювання монооксиду вуглецю у порожнині конвертера зі збільшенням відстані фурми зростає, що пов'язано з великим потоком кисню у верхній зоні конвертера. Ці дослідження підтверджені нами при використанні п'ятисоплових фурм із соплами Лавалля [6]. Їх результати з перерахуванням кількості CO, що додатково окиснюється зі збільшенням відстані фурми, на температуру ванни наведено на рис. 2. Зростання відстані фурми до рівня спокійної ванни веде до підвищення температури.

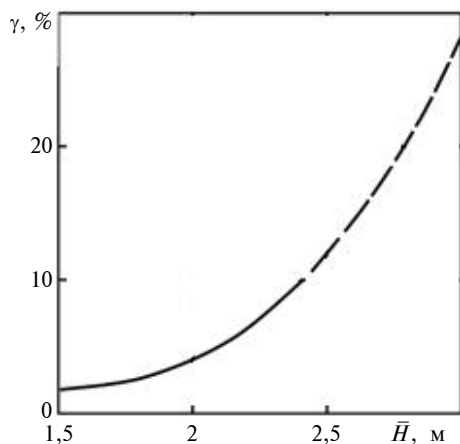


Рис. 1. Залежність ступеня допалювання монооксиду вуглецю у порожнині конвертера  $\gamma$  від середньозваженої за продувку висоти фурми над рівнем розплаву  $\bar{H}$ ; — — — — лінія нетехнологічної продувки

Дослідження свідчать, що тільки близько 70 % теплоти, що виділяється при допалюванні CO, засвоюється ванною, а 30 % йде на втрати випромінюванням через горловину конвертера та на нагрів верхніх шарів футерівки порожнини конвертера. Теплота останніх слабо засвою-

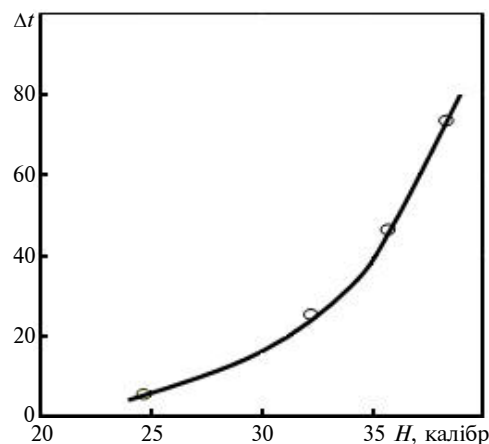


Рис. 2. Залежність температури ванни від відстані фурми до рівня спокійної ванни, що впливає на ступінь допалювання монооксиду вуглецю в порожнині 350-тонного конвертера

ється ванною. Перегрів футерівки призводить до її руйнування, тому просте підвищення відстані фурми не веде до позитивних результатів.

Розглянемо, як змінюється рівень газо-шлако-металевої емульсії зі зміною відстані фурми. Збільшення ступеня допалювання CO у порожнині конвертера призводить до зменшення кількості кисню, що потрапляє у ванну (кисень частково використовується на реакцію  $\text{CO} + 0,5\text{O}_2 = \text{CO}_2$ ), тобто знижує швидкість зневуглецювання. Це веде до зменшення об'єму спученої конвертерної ванни  $\Delta V$ ,  $\text{м}^3$ , що пропорційно швидкості утворення об'ємів CO,  $V_{\text{CO}}$ ,  $\text{м}^3/\text{хв}$ , тобто швидкості зневуглецювання і тривалості знаходження об'ємів газу у ванні  $\tau$ :

$$\Delta V = V_{\text{CO}}\tau.$$

Зменшення при цьому рівня ванни  $\Delta h_{\text{в}}$ , калібр, визначають за формулою [1]

$$\Delta h_{\text{в}} / h_{\text{в}} = k(\eta_{\text{C}}v)^a h_{\text{в}}^b / n^c,$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності;  $\eta_{\text{C}}$  – частка кисню, витрачена на окиснення вуглецю;  $v$  – інтенсивність продувки,  $\text{м}^3/\text{хв}$ ;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти, що дорівнюють  $a = 0,7$ ,  $c = 0,6$ ,  $b$  – залежить від місткості конвертера.

Таким чином, рівень газо-шлако-металевої емульсії знижується при збільшенні рівня відстані фурми від рівня спокійної ванни й підвищується зі зниженням відстані фурми.

Для підвищення ступеня утилізації теплоти допалювання монооксиду вуглецю у робочому просторі конвертера періодично зміню-

ють відстань фурми від поверхні металу, що викликає коливання рівня метало-шлако-газової емульсії. Коли фурма перебуває у нижній точці, тобто найближче до поверхні спокійної ванни. Остання внаслідок збільшення її газонасиченості спучується й ефективно поглинає тепло, акумульоване активним шаром верхньої частини футерівки, яка нагріта продуктами допалювання у ті періоди, коли фурма піднята.

Отже, спостерігається ефект процесу Калдо, так як радіаційний нагрів ванни від факела горіння оксиду вуглецю проходить переважно акумуляцією в активному шарі футерівки. При цьому періодичне омивання футерівки емульсією сприяє збільшенню тривалості її кампанії внаслідок зменшення теплонапруженості активного шару.

Надавши фурмі зворотно-поступального руху і змінюючи його амплітуду та частоту, можна забезпечити максимально можливу об'ємну частку  $\text{CO}_2$  у конвертерному газі, тобто максимальний ступінь використання його хімічного тепла.

Керуючі дії реалізують таким чином.

Для кожного періоду продувки визначається статичне значення відстані фурми до рівня спокійної ванни (нижня точка відстані фурми).

У першому періоді продувки статичне значення відстані торця фурми над рівнем спокійної ванни визначається залежно від маси залишеного після попередньої плавки шлаку, насипної щільності брухту й інтенсивності подання дуття:

$$H_n = H_n^0 - 0,85(m_{\text{шл}} - m_{\text{шл}}^0) + (\gamma - \gamma^0) + 0,89(\sqrt{v_n} - \sqrt{v_n^0}) + \Delta H', \quad (1)$$

де  $H_n$  – початкове положення торця фурми відносно рівня спокійної ванни, калібр;  $m_{\text{шл}}$  – маса шлаку, залишеного в конвертері після попередньої плавки, т;  $\gamma$  – коефіцієнт, що визначається насипною щільністю брухту та рівний 3 у випадку легковагового брухту, 0 – при середній насипній щільності брухту і 0,75 – для важковагового брухту, калібр;  $v_n$  – початкове значення інтенсивності продувки,  $\text{м}^3/\text{хв}$ ;  $\Delta H'$  – поправка положення фурми, що визначається за досвідом попередньої плавки, калібр. Тут індекс “0” характеризує параметри із плавки позитивного досвіду [7].

У другому періоді продувки відстань торця фурми відносно рівня спокійної ванни встановлюють на значенні, яке відповідає плавці пози-

тивного досвіду  $H = H^0$ . У випадку відхилення режиму шлакоутворення порівняно із плавкою позитивного досвіду корегується положення фурми

$$\Delta H = -3,8 + 0,36(A - A^0) - 0,022[(\Delta\tau_n - \Delta\tau) - (\Delta\tau_n - \Delta\tau)^0],$$

де  $\Delta H$  – корекція статичного значення положення фурми, калібр;  $A$  – відносна акустична характеристика продувки, %;  $\Delta\tau_n$ ,  $\Delta\tau$  – відповідно, початкове й поточне значення часу запізнення теплового сигналу на фурму, с.

При відхиленнях режиму шлакоутворення від заданого у межах

$$-0,75 < \Delta H < (0,75 + 0,25m_{\text{шл}})$$

підтримується значення положення фурми таке ж, як на плавці позитивного досвіду.

При відхиленнях режиму шлакоутворення від заданого у межах

$$-1,5 < \Delta H \leq -0,75$$

або

$$(0,75 + 0,25m_{\text{шл}}) \leq \Delta H < 2(0,75 + 0,25m_{\text{шл}})$$

встановлюють відстань фурми

$$H = H^0 + \Delta H. \quad (2)$$

Якщо  $\Delta H < -1,5$  (дуже рідкий шлак), то разом зі зниженням положення фурми вводять добавку вапна питомою масою

$$m_{\text{п.в}} = 0,0025 + 0,165m_{\text{шл}}$$

і встановлюють витрату дуття

$$v = 1,15v^0,$$

де  $m_{\text{п.в}}$  – питома маса вапна, т/т сталі.

Якщо  $\Delta H > 2(0,75 + 0,25m_{\text{шл}})$  (дуже густий шлак), то разом із підвищенням відстані фурми вводиться добавка плавикового шпату

$$m_{\text{шл}} = 0,0025 + 0,072m_{\text{шл}}.$$

Для реалізації енергозберігаючої технології фурмі надають зворотно-поступального руху при постійній швидкості переміщення відносно статичних значень, що визначені за формулами (1), (2). При цьому в разі збільшення амплітуди її переміщення частота знижується, і навпаки. Між послідовними змінами керуючих

дій (амплітуди та частоти коливань фурми) проводять витримку часу, що дорівнює запізненню відгуку в об'єкті на ці збурення (експериментально визначений час дорівнює 30 с).

Періодичну зміну відстані фурми в режимі зануреного струменя проводять за такими залежностями

$$W = K_1,$$

$$\Delta H_{(n+1)} = \Delta H_n + K_2,$$

$$\text{якщо } \Delta H_n > \Delta H_{(n-1)}, \quad \gamma_{\text{CO}_2 n} \geq \gamma_{\text{CO}_2(n-1)};$$

або

$$\Delta H_{(n+1)} = \Delta H_n + K_2,$$

$$\text{якщо } \Delta H_n < \Delta H_{(n-1)}, \quad \gamma_{\text{CO}_2 n} < \gamma_{\text{CO}_2(n-1)},$$

$$\Delta H_{(n+1)} = \Delta H_n - K_2,$$

$$\text{якщо } \Delta H_n < \Delta H_{(n-1)}, \quad \gamma_{\text{CO}_2 n} \geq \gamma_{\text{CO}_2(n-1)};$$

або

$$\Delta H_{(n+1)} = \Delta H_n - K_2,$$

$$\text{якщо } \Delta H_n > \Delta H_{(n-1)}, \quad \gamma_{\text{CO}_2 n} < \gamma_{\text{CO}_2(n-1)},$$

де  $W$  – швидкість руху фурми, калібр/хв;  $K_1, K_2$  – коефіцієнти;  $\gamma_{\text{CO}_2}$  – ступінь окиснення газу до  $\text{CO}_2$  у порожнині конвертера;  $(n-1), n, (n+1)$  – індекси попереднього, поточного та наступного значень уставок керуючого параметра.

Ступінь окиснення конвертерного газу до  $\text{CO}_2$  в порожнині конвертера визначають за формулою

$$\gamma_{\text{CO}_2} = 1 - \gamma_{\text{CO}}, \quad (3)$$

$$\gamma_{\text{CO}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 10^3 v_C q_{\text{CO}_2} - i_{\text{CO}_2} \Delta p_1 f_1 (V_K - V_B)}{2 \cdot 10^3 v_C (q_{\text{CO}_2} - q_{\text{CO}}) - (i_{\text{CO}_2} - i_{\text{CO}}) \Delta p_1 f_1}, \quad (4)$$

де  $\gamma_{\text{CO}}$  – ступінь окиснення вуглецю до  $\text{CO}$  у порожнині конвертера;  $q_{\text{CO}}, q_{\text{CO}_2}$  – питомі теплові ефекти реакції окиснення вуглецю ванни, відповідно,  $\text{CO}$  і  $\text{CO}_2$ , кДж/кг;  $i_{\text{CO}}, i_{\text{CO}_2}$  – із врахуванням коливального числа ступенів вільності руху однієї молекули  $\text{CO}$  і  $\text{CO}_2$  відповід-

но;  $V_K, V_B$  – відповідно, об'єми порожнини конвертера і ванни,  $\text{м}^3$  [8];  $\Delta p_1$  – амплітуда коливань тиску газу в робочому просторі конвертера, Па;  $f_1$  – частота коливань тиску газу там само, Гц.

У результаті проведених нами досліджень встановлено, що запропоноване керування конвертерною плавкою в умовах енергозберігаючої технології збільшує частку переробленого брухту в металевій шихті на 1,5 %.

### Регулювання процесу при застосуванні двоконтурних фурм

Дослідження проводились для двоярусної фурми, що розроблена А.Г. Чернятевичем для конвертерів місткістю 160 т [9]. Конструкція включає:

- нижню 4-соплову суцільноточену головку із соплами Лавалля критичного діаметра 36 мм, розташованими під кутом  $15^\circ$  до вертикалі, що формують надзвукові кисневі струмені при витраті кисню 380–390  $\text{м}^3/\text{хв}$  для “жорсткої” продувки конвертерної ванни з метою прискорення розчинення брухту, підвищення інтенсивності зневуглецювання і перемішування розплаву;

- верхній суцільноточений 24-сопловий блок із циліндричними соплами діаметром 8 мм, розташований на відстані 2,5 м від торця нижньої головки, який формує додаткові надзвукові кисневі струмені при витраті кисню 15–20  $\text{м}^3/\text{хв}$  та забезпечує часткове допалювання відхідних газів і своєрідну завісу над зоною продувки, що сприяє запобіганню заметалювання стовбура фурми, горловини та каміна газозовидного тракту конвертера.

Контур регулювання побудований для верхнього соплового блока та забезпечує екстремальне значення допалювання відхідних газів. Задане значення інтенсивності продування на другому контурі визначається як функція ступеня окиснення конвертерного газу до  $\text{CO}_2$  в порожнині конвертера за формулами (3) і (4).

Інтенсивність подання дуття визначається відповідно до таких залежностей:

$$v_{(n+1)} = v_n + K_3, \quad \text{якщо } v_n > v_{(n-1)},$$

$$\gamma_{\text{CO}_2 n} \geq \gamma_{\text{CO}_2(n-1)},$$

або

$$v_{(n+1)} = v_n + K_3, \text{ якщо } v_n < v_{(n-1)},$$

$$\gamma_{\text{CO}_2 n} < \gamma_{\text{CO}_2 (n-1)};$$

$$v_{(n+1)} = v_n - K_3, \text{ якщо } v_n > v_{(n-1)},$$

$$\gamma_{\text{CO}_2 n} \geq \gamma_{\text{CO}_2 (n-1)};$$

або

$$v_{(n+1)} = v_n - K_3, \text{ якщо } v_n > v_{(n-1)},$$

$$\gamma_{\text{CO}_2 n} < \gamma_{\text{CO}_2 (n-1)},$$

де  $v$  – інтенсивність дуття на другий ярус,  $\text{м}^3/\text{хв}$ ;  $K_3$  – коефіцієнт, що дорівнює  $0,1 v_n$ .

Регулювання інтенсивності дуття відбувається за ПІД-законом. Як технічний засіб використано мікроконтролер ROC809.

Керування конвертерною плавкою в умовах енергозберігаючої технології з використанням двоярусної фурми збільшує частку переробленого брухту в металевій шихті на 2–3 %.

## Висновки

При застосуванні одноконтурних фурм регулювання процесу відбувається за рахунок переміщення фурми. Надавши фурмі зворотно-поступального руху і змінюючи його амплітуду та частоту, можна забезпечити максимально можливу об'ємну частку  $\text{CO}_2$  в конвертерному газі, тобто максимальний ступінь використання його хімічного тепла.

При використанні двоконтурних фурм є можливість регулювати процес, змінюючи інтенсивність дуття на верхньому контурі.

Задані значення відстані амплітуди та частоти переміщення фурми й інтенсивності продування на другому контурі визначаються як функції ступеня окиснення конвертерного газу до  $\text{CO}_2$  в порожнині конвертера.

Подальші дослідження будуть проводитись у напрямі розроблення системи керування режимом дуття як складової частини АСКТП конвертерної плавки.

1. Чернега Д.Ф., Богушевський В.С., Готвянський Ю.Я. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підруч. – К.: Вища шк., 2006. – 504 с.
2. Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Підруч. – Дніпропетровськ: РВА “Дніпро-ВАЛ”, 2004. – 454 с.
3. Бигеев А.М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 480 с.
4. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Чернятевич И.В. Новые разработки конструкций кислородных фурм и способов продувки ванны 160-т конвертеров ОАО “АрселорМиттал Кривой Рог” // Теория и практика металлургии. – 2010. – 2, № 1 – С. 31–38.
5. Богушевський В.С., Литвинов Л.Ф., Рюмишин Н.А. Математические модели и системы управления конвертерной плавкой. – К.: НПК “Киевский институт автоматизации”, 1998. – 304 с.
6. Богушевський В.С., Сергеева Е.А., Жук С.В. Динамическая модель управления температурным режимом конвертерной ванны // Металл и литье Украины. – 2011. – № 5 (216). – С. 24–28.
7. Богушевський В.С., Сухенко В.Ю., Сергеева К.О. Система прийняття рішень при керуванні киснево-конвертерною плавкою // Нові технології. – 2009. – № 1. – С. 98–101.
8. Богушевський В.С., Рюмишин Н.А., Сорокин Н.А. АСУ ТП производства стали в конвертерах. – К.: Техніка, 1991. – 180 с.
9. Чернятевич И.В. Розробка комплексної ресурсо- та енергозберігаючої технології продувки конвертерної ванни і нанесення шлакового гарнісажу на футерівку агрегату: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Дніпро-дзержинськ, 2011. – 22 с.