

УДК 669.184.244.66.001.57-52

**ПРО ВИКОРИСТАННЯ ДЕТЕРМІНОВАНОГО ПІДХОДУ ПРИ ПОБУДОВІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ***В. С. Бозушевський, В. Ю. Сухенко**Національний технічний університет України  
„Київський політехнічний інститут”*

*Досліджені детерміновані моделі киснево-конвертерної плавки. Проаналізований характер і величина похибок, що виникають при використанні моделей при керуванні реальним процесом.*

*Исследованы детерминированные модели кислородно-конвертерной плавки. Проанализирован характер и величина погрешностей, которые возникают при применении моделей для управления реальным процессом.*

*The determined models basic oxygen swimming trunks are investigated. Character and size of errors which arise at application of models for management of real process are analyzed.*

**Вступ**

Конвертерний процес як об'єкт математичного моделювання є складною системою, в якій проходять процеси, що визначаються законами термодинамики, тепло- і масопереносу, гідроаеродинаміки, кінетики та іншими. Теоретичні й експериментальні дослідження цих процесів є базисом для побудови їх математичного описання. В роботах [1, 2] проведена формалізація окремих явищ, що проходять в конвертерному процесі, на базі термодинамічних представлень, як найбільш розробленої частини теорії переробки.

У відповідності із першим законом термодинаміки складаються баланси конвертерної плавки. Як баланс енергії конвертерного процесу може бути складений тепловий баланс плавки, наприклад, для інтервалу часу продувки і для простору, що обмежений кожухом конвертера і площиною зрізу горловини. Баланс речовини можна розбити на ряд окремих балансів хімічних елементів, що приймають участь в процесі. В результаті утворюється деяке число балансових рівнянь, що складають систему, оскільки окремі баланси зв'язані між собою.

Розроблені при цьому моделі поділяються на моделі без і з зворотним зв'язком. Серед перших заслуговує на увагу модель фірми

Джонс & Лафлин для заводу в Алікуіпе США [3], що представлена у вигляді трьох рівнянь:

$$\begin{cases} m_6 = \{ [m(66,4Si_{\text{ч}} + 16,4Mn_{\text{ч}} + 0,262t_{\text{ч}} - 286) - 599m_{\text{в}} - 5,38 \cdot 10^5 B + \\ + 41,8 \cdot 10^5 - 1393t_{\text{М}} - 24,7 \cdot 10^6(0,165 - 7,32H) - 1196(m_{\text{р}} + m_{\text{ок}})] / \\ / [66,4Si_{\text{М}} + 16,4Mn_{\text{М}} + 50,3 - 1077(0,165 - 7,32H)] \} - 30,3\tau_{\text{п}}; \\ m_{\text{в}} = 0,6B \cdot Si_{\text{ч}} \cdot m_{\text{ч}} / (28 \cdot 0,92); \\ m_{\text{ч}} = m - m_6, \end{cases} \quad (1)$$

де  $m_6$ ,  $m_{\text{ч}}$ ,  $m_{\text{в}}$ ,  $m_{\text{р}}$ ,  $m_{\text{ок}}$ ,  $m$  – маса брухту, чавуна, вапна, руди, окалини, металошихти, т;  $H$  – висота фурми над рівнем спокійної ванни, калібр;  $Mn_{\text{ч}}$ ,  $Si_{\text{ч}}$  – масові частки в чавуні мангану, силіцію, %;  $t_{\text{ч}}$ ,  $t_{\text{М}}$  – температура чавуна і металу в кінці продувки, °С;  $B$  – основність кінцевого шлаку;  $Mn_{\text{М}}$ ,  $Si_{\text{М}}$  – масові частки мангану і силіцію в металі в кінці продувки, %;  $\tau_{\text{п}}$  – тривалість простою конвертера, хв.

Загальним недоліком цих моделей є неадекватність описання процесів, що проходять у ванні конвертера, яка пов'язана з припущеннями при розробці моделі. Крім того, виникають похибки при вимірі вхідних параметрів процесу, що призводять до відхилення значень температури сталі, розрахованих навіть за ідеальною статичною моделлю, від фактичних значень температури. При цьому величина відхилення зіставна з величиною заданого інтервалу температур. Такий же результат отриманий при дослідженні балансових методів прогнозування вмісту вуглецю в сталі.

### Постановка задачі дослідження

Метою дослідження є аналіз причин і величин похибок, що виникають при застосуванні детермінованих моделей, виявлення можливостей використання цих моделей для керування конвертерним процесом, розробка рекомендацій по покращанню моделей.

### Методика проведення експериментів

Дослідження технологічних закономірностей проводились за даними конвертерного цеху Єнакіївського металургійного заводу з конвертерами ємністю 140 тон. Технологія продувки в процесі досліджень характеризувалася наступним чином. В конвертерах переплавлявся переробний чавун з вмістом (%) силіцію 0,4...1,0, мангану 0,5...1,2, сірки 0,02...0,07, фосфору 0,02...0,15 і температурою 1200...1400 °С. В завалку завантажували 0...30 % від маси чавуну металевого брухту. Рідкий чавун із міксера подавали 100 т ковшах.

Як шлакоутворюючі використовували вапно в кількості 8...15 % і плавиковий шпат – 0,1... 0,5 %. Продувку проводили через багатосоплові

фурми с кількістю сопел 4, з кутом вісі сопла до вертикалі 15...20 град. Інтенсивність подання кисню становила 3...3,5 м<sup>3</sup>/(т×хв). Сортамент марок сталі характеризувався вмістом вуглецю 0,09...0,40 % і температурою випуску 1580... 1630 °С.

Дослідження проводились на плавках поточного виробництва. На всіх плавках відбиралися проби чавуну, металу і шлаку на повалках конвертера і фіксувалися вихідні параметри процесу.

Технологічне устаткування було оснащено наступними засобами контролю параметрів з пристроями передання інформації в УОК:

- крановими електронно-тензометричними вагами для виміру маси брухту в совку, чавуна і сталі в ковші з точністю 0,5 %;
- вимірювальною системою контролю температури чавуна з точністю 8 °С;
- газоаналізаторами газів, що відходять з конвертера, і дуття під час продувки системи ФТІАН;
- витратомірами дуття з точністю 0,5 %;
- вимірювальними системами контролю хімічного складу чавуна, металу і шлаку з точністю виміру за ДСТУ.
- вимірювачем висота фурми над рівнем спокійної ванни, з точністю 0,165 калібр

### Результати досліджень

Розглянемо, до яких помилок призводить використання чисто детермінованих моделей на прикладі балансового контролю масової частки вуглецю у ванні конвертера за газовим аналізом газів, що відходять:

$$C_{\tau} = \left[ C_0 m - 0,536 \times 10^{-3} \int_{(\tau)} v_{\Gamma} (r_{CO} + r_{CO_2}) d\tau \right] / m_{\tau}, \quad (2)$$

де  $C_{\tau}$ ,  $C_0$  – масова частка вуглецю в металі в момент часу  $\tau$  і перед продувкою, %;  $v_{\Gamma}$  – витрати газів, що відходять, м<sup>3</sup>/хв;  $r_{CO}$ ,  $r_{CO_2}$  – масова частка CO і CO<sub>2</sub> в газах, що відходять, %;  $m_{\tau}$  – маса металу в момент часу  $\tau$ , т;  $\tau$  – поточний час продувки, хв. Тут

$$C_0 = (C_{\delta} m_{\delta} + C_{\text{ч}} m_{\text{ч}} + C_{\text{в}} m_{\text{в}} + C_{\text{вп}} m_{\text{вп}}) / (m_{\delta} + m_{\text{ч}}); \quad (3)$$

$$m_{\tau} = m_{\delta} + m_{\text{ч}} - k\tau, \quad (4)$$

де  $C_{\delta}$ ,  $C_{\text{ч}}$ ,  $C_{\text{в}}$ ,  $C_{\text{вп}}$  – частка вуглецю в брухті, чавуні, вапні, вапняку;  $m_{\text{вп}}$  – маса вапняку, т.

Точність метода внаслідок похибок виміру витрати і хімічного складу газу, що відходить, параметрів чавуна проаналізована в [3], а таких

параметрів, як домішки в брукті і міксерного шлаку в чавуні, в [4]. Розглянемо вплив таких параметрів, як масові частки вуглецю в металевому брукті, коливань недопалу вапна і вигару металу в конвертерах садкою 160 тонн.

Як відомо у вітчизняних конвертерних цехах не проводиться усереднення брукту за хімічним складом. Зустрічаються випадки завантаження в конвертер замість брукту настилів із чавуновізних ковшів. Якщо частка вуглецю в брукті відповідає 0,35 %, то при масі брукту 40 т в конвертер вноситься  $0,35 \cdot 10^{-2} \cdot 40 = 0,14$  т вуглецю, а при його частці 0,1 % – відповідно 0,04 т. Різниця складає 0,1 т, а в перерахунку на масову частку вуглецю в металі в кінці продувки (135 т) – 0,074 %. Таким же чином можна знайти, що неконтрольована зміна недопалу вапна на 10 % приведе до зміни кількості вуглецю, що вигоряє, на 0,09 %. Зміна виходу корисного на 0,01 еквівалентна похибці у визначенні вуглецю, що вигоряє, на 0,045 %. Середня швидкість вигару металеві частини садки також залежить від багатьох факторів і змінюється від плавки до плавки.

Проконтролювати зміни вказаних параметрів вельми важко, тому використовують їх значення, визначені статистичним шляхом, у сукупності з врахуванням досвіду попередніх плавок, чим порушується суворість теоретичного підходу.

Очевидний шлях збільшення ефективності прогнозування і керування полягає в конструюванні нових і покращанні існуючих датчиків з метою підвищення їх точності, а також в поліпшенні адекватності математичної моделі процесу. Але навіть без приймання цих мір ефективність керування можна підвищити шляхом доповнення балансових моделей елементами зворотного зв'язку за результатами раніш проведених плавок.

Прогнозування вихідних параметрів процесу проводиться за формулами

$$C_M = \{m_{\text{ч}} [10,0C_{\text{ч}} + 8,57Si_{\text{ч}} + 2,19(Mn_{\text{ч}} - 0,9Mn_M) + 9,68(P_{\text{ч}} - 0,9P_M) + 2,14\Delta Fe] + m_{\text{б}}(0,219Mn_M + 0,968P_M) - m_{\text{п}}(2,25Fe_2O_{3\text{п}} + 1,66FeO_{\text{п}}) + 1,07L - 0,0107V\xi\} / 0,9(m_{\text{ч}} - m_{\text{б}}); \quad (5)$$

$$t_M = \{m_{\text{ч}} [12050 + 200t_{\text{ч}} + 27310(C_{\text{ч}} - 0,9C_M) + 72750Si_{\text{ч}} + 16085(Mn_{\text{ч}} - 0,9Mn_M) + 74075(P_{\text{ч}} - 0,9P_M) + 10875\Delta Fe - 3,27(C_{\text{ч}} - 0,9C_M) - m_{\text{б}}(13950 - 2731C_M - 2253Mn_M - 8552P_M + 0,327C_M t_{\text{ч}}) - 50000m_{\text{в}} - 50000m_{\text{ш}} - 0,21Lt_{\text{ч}} + 6040L - Q_{\text{п}} - m_{\text{п}}(12300Fe_2O_{3\text{п}} + 8940FeO_{\text{п}})] / \{m_{\text{б}} [180 + 3,27(C_{\text{ч}} - 0,9C_M) + 6,38Si_{\text{ч}} + 3,84(Mn_{\text{ч}} - 0,9Mn_M) + 6,82(P_{\text{ч}} - P_M) + 3,84\Delta Fe] + m_{\text{б}}(180 + 0,327C_M - 3,46Mn_M - 6,14P_M) + 0,21L + 298m_{\text{в}} + 298m_{\text{ш}}\} \quad (6)$$

де  $C_m$ ,  $P_m$  – масові частки відповідно вуглецю і фосфору в металі в кінці продувки, %;  $P_c$  – масова частка фосфору в чавуні, %;  $\Delta Fe$  – кількість заліза, що окиснюється за плавку, віднесена до маси чавуна, т/т;  $Fe_2O_{3p}$ ,  $FeO_p$  – масова частка оксидів заліза в руді, %;  $L$  – кількість кисню, що витрачається на допалювання CO в  $CO_2$  в порожнині конвертера,  $m^3$ ;  $V$  – об'єм кисневого дуття на плавку,  $m^3$ ;  $\xi$  – чистота кисневого дуття, %;  $m_{ш}$  – маса шпату, т;  $Q_p$  – теплові втрати конвертера, кДж.

Зворотний зв'язок може бути реалізований різними способами. Припустимо, наприклад, що відхилення фактичних значень вихідних параметрів від заданих, яке очікується на поточній плавці, буде таким же, як і в попередній плавці, або буде складати визначену частку останнього. Тоді, знаючи величину відхилення на попередній плавці, можна ввести відповідну корекцію в розрахунки поточної плавки. Інший спосіб – це зміна коефіцієнтів при параметрах математичної моделі на основі даних про результати попередніх плавок.

В моделі (5, 6) зворотний зв'язок виконується наступним чином. При розрахунку керуючих діянь першої плавки використовують відомі з досвіду середні значення  $\Delta Fe$  і  $L$ . Після закінчення плавки проводиться експрес-аналіз сталі на вміст вуглецю і вимірюється її температура. Ці фактичні значення підставляються в рівняння моделі, що потім вирішуються відносно  $\Delta Fe$  і  $L$ . При розрахунку отримуємо фактичні значення цих величин, які використовують як відомі при обчисленні параметрів наступної плавки.

Моделі, що базуються на другому законі термодинаміки (розрахунку рівноваги хімічних реакцій), мають обмежене використання. Якщо припустити, що в кінці продувки реакції окиснення елементів ванни приходять до рівноваги, то розрахунок рівноважних концентрацій легко виконати на основі відомих фізико-хімічних методів. Питання полягає в іншому – наскільки коректно припущення про існування рівноваги в конвертерній ванні? Сам по собі факт швидкого протікання реакцій в конвертері свідчить про існування хімічно нерівноважного стану. Крім того, порівняння окиснюючого потенціалу кисневого струменю зі складом металевий ванни показує неможливість взаємоіснування цих фаз в умовах рівноваги. Високий окиснюючий потенціал припускає рівноважне існування тільки окислів заліза.

Таким чином, для конвертерного процесу в цілому, тобто для системи метал–шлак–газ, рівноважний стан недосяжний. В той же час можливе наближення до рівноваги окремих реакцій, наприклад реакції окиснення мангану. Характеризуючи в цілому ефективність використання представлень про рівновагу реакцій в кінці продувки конвертерної ванни, слід відмітити, що вони корисні для орієнтовної оцінки хімічного складу

кінцевого шлаку, вмісту в металевій ванні мангану, фосфору і сірки. Необхідно відмітити, що точність прогнозування з використанням термодинамічних співвідношень підвищується при низькому вмісті вуглецю в металі [5].

### **Висновки**

1. В детермінованих моделях керування розглядається початковий і кінцевий стан об'єкта в кожній плавці. Початковий стан визначається, в першу чергу, властивостями сировини, кінцевий же характеризується властивостями кінцевого продукту (сталі і шлаку) і звичайно входить у вираз критерію керування (або обмежень), де порівнюється з відповідними заданими значеннями властивостей продукту.

2. Детерміновані моделі в силу припущень, що приймаються при їх створенні, призводять до великих похибок при прогнозуванні реального процесу плавки в конвертері й не можуть використовуватися при керуванні. Зменшення похибки досягається використанням зворотного зв'язку за раніш проведеними плавками.

3. Детерміновані моделі доцільно використовувати при теоретичному вивченні процесів, що проходять в об'єктах керування, особливо при проектуванні нових технологічних процесів і агрегатів.

### **Література**

1. Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія). – Дніпропетровськ: РВА „Дніпро-ВАЛ”, 2004. – 454 с.
2. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д.Ф.Чернега, В.С.Богушевський, Ю.Я.Готвянський та ін.; За ред. Д.Ф.Чернеги, Ю.Я.Готвянського. – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.
3. Математические модели и системы управления конвертерной плавкой / В.С.Богушевский, Л.Ф.Литвинов, Н.А.Рюмшин, В.В.Сорокин. – К.: НПК „Киевский институт автоматики”, 1998. – 304 с.
4. М.Д.Шарбатиан, В.С.Богушевский. Влияние неконтролируемых возмущающих воздействий на управление процессом шлакообразования//Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: Збірник праць співробітників і випускників кафедри ФХОТМ. – К.: ІВЦ „Видавництво „Політехніка”, 2007. – С. 155 – 163.
5. V.Bogushevsky, M.Sharbatian, V.Suhenko. Automatic control of converter process//Materialy IV Mezinarodni Vedecko-Practicka Ronference “Evropska Veda XXI Stoleti-2008”, 16 – 30 kvetna 2008 roku. – P. 26 – 29.