

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ

Анотація: Досліджені методи створення моделі технологічного процесу. Наведена “статична” модель керування конвертерною плавкою. Проаналізована адаптація моделі шляхом зміни поправочних коефіцієнтів у процесу експлуатації.

Ключові слова: конвертерна плавка, керування плавкою, статична модель.

Вступ

Конвертерний процес – основний спосіб виробництва сталі. У світовому виробництві частка конвертерної сталі становить приблизно 60 %. Сутність конвертерного виробництва полягає в продувці рідкого чавуну киснем, в наслідок якої елементи чавуну – вуглець, силіцій, манган, фосфор та інші – окиснюються, а продукти реакцій переходять в шлакову і газову фазу [1]. Киснево-конвертерна плавка відрізняється складністю фізико-хімічних процесів, проходить з великою швидкістю і при високій температурі, характеризується багаторежимністю функціонування і великою розмірністю задач, присутністю нестационарних і взаємнокорельованих шумів і перешкод вимірювання, має суттєвий дрейф робочих параметрів.

При таких умовах оператор фізично не встигає переробити великий об’єм інформації, вибрати найкращий режим і оперативно вмішатися в хід плавки. Як наслідок до 40 % плавок потребують коректування після завершення процесу. Автоматизація конвертерного процесу дозволяє суттєво підвищити його ефективність і якість сталі, що виплавляється.

До цього часу розроблено ряд математичних моделей конвертерної плавки [2 – 5], які важко використовувати, тому що вони створені для вузьких діапазонів зміни температури і хімічного складу шлаку. Моделі нелінійні відносно масових часток домішок. Вони дозволяють отримати деяку „середню” плавку з метою дослідження окремих особливостей процесу. Задача ж моделювання конкретних плавок на порядок складніша.

Все це підтверджує актуальність рішення проблеми створення математичної моделі керування конвертерним процесом.

Наведені у статті дослідження проводились у відповідності з тематичним планом Державної науково-виробничої корпорації „Київський інститут автоматики” Мінпромполітики України, планом найважливіших робіт ВАТ Металургійний комбінат „Азовсталь”, у рамках госпдоговірної тематики.

Постановка задачі

Метою досліджень є створення моделі, що охоплює всі періоди конвертерної плавки на основі теоретичного обґрунтування і розробки методів отримання достовірної і надійної інформації про хід процесу і реалізації згаданого в АСКТП конвертерної плавки.

Маючи вибірку траєкторій керування успішно проведених плавок ($\vec{U}_1[\tau], \dots, \vec{U}_n[\tau]$), можна говорити про виділення в реальній траєкторії $\vec{U}_i[\tau]$, двох складових: програмної частини $\vec{U}_{i_{np}}[\tau]$ і додаткового керування $\Delta\vec{U}_i[\tau]$, що зв'язане як з неточним визначенням вихідного стану плавки, так і з діянням збурювань. Таким чином, стратегія керування не може бути зведена тільки до детермінованої, а включає детерміновану частину по вибору програми і стохастичну для керуючих діянь.

При проведенні плавок, спостерігаючи за діянням різних збурювань на якість металу і оцінюючі за непрямыми спостереженнями відхилення ходу плавки від нормального, оператор дослідним шляхом підбирає додаткове керування, що найбільш ефективно діє в кожному конкретному випадку. Цей досвід може бути зафіксований, зокрема з допомогою матриці ймовірностей вибору додаткового керування для кожного визначеного збурення. При цьому вважаємо: оптимальні траєкторії руху системи при однакових початкових і кінцевих станах є близькими на більшій частині. Це дозволяє розділити всю сукупність поточних плавок на класи і виділити “зразкову” плавку у кожному класі.

Проведення досліджень

Дослідження проводились на 350-т конвертерах ВАТ Металургійний комбінат „Азовсталь”. Модель створювалась для розрахунку шихти („статичне керування”), керування плавкою в процесі продування („динамічне керування”), доводки плавки після виміру вмісту вуглецю і температури ванни без перерви продування і розрахунку розкиснювачів [6].

Основою математичного опису технології киснево-конвертерної плавки є управління за „зразковими” плавками. Класифікація плавок проводилась по кожній задачі окремо. При цьому інтервали розбиття значень параметрів при класифікації вибирались достатньо великими, щоб знизити кількість класів [7]. Це призвело до того, що зразкова плавка, що знаходилась в кожному класі, могла суттєво відрізнитися, від поточної плавки, що попала у даний клас. Коректування „зразкової” плавки відбувалось за системою рівнянь, що складені на основі балансових співвідношень.

Розглянемо реалізацію такого підходу для розробки „статичної” моделі. „Статична” модель включає розрахунок витрати дуття, вапняку, вапна і плавикового шпату на плавку, а також заданий режим дуття. При цьому складена система рівнянь на основі балансових співвідношень по кисню, теплу і шлакоутворюючим, коефіцієнти в яких уточнюються регресійним аналізом. Для виключення впливу збурень, що повільно змінюються (зношення футерівки конвертера, фурменого кінцевика, роз-

гаряння горловини та інш.) рівняння складені за зміною параметрів по відношенню до „зразкової” плавки:

$$\left\{ \begin{array}{l} V = V^0 + \alpha_1(m_\sigma - m_\sigma^0) + \alpha_2 |m_u - m_u^0| (m_u - m_u^0) + \alpha_3(m_u - m_u^0) + \\ + \alpha_4(Si_u - Si_u^0) - K_1 [f_1(C_{M.з.}) - f_1(C_M^0)] - [f(m_{en}) - f(m_{en}^0)] + \\ + \alpha_5(m_\sigma - m_\sigma^0) + \alpha_6(m_{ш} - m_{ш}^0) + \alpha_7(H_3 - H^0) + \Delta V; \\ m_{en} = m_{en}^0 - \alpha_8(m_\sigma - m_\sigma^0) - K_2(m_\sigma + m_u)(t_{M.з.} - t_M^0) + \alpha_9(m_u - m_u^0) + \\ + \alpha_{10}(m_\sigma - m_\sigma^0) + \alpha_{11}(Si_u - Si_u^0) + \alpha_{12}(Mn_u - Mn_u^0) - \\ - \alpha_{13} [f_2(C_{M.з.} - C_M^0)] + \alpha_{14}(m_\sigma - m_\sigma^0) + \alpha_{15}(m_{ш} - m_{ш}^0) - \\ - [f(\tau_{II}) - f(\tau_{II}^0)] - [f(N) - f(N^0)] + \alpha_{16}(H_3 - H^0) + \Delta m_{en}; \\ m_\sigma = m_\sigma^0 - \alpha_{17}(m_\sigma - m_\sigma^0) + \alpha_{18}(m_u Si_u - m_u Si_u^0) + \Delta m_\sigma; \\ m_{ш} = m_{ш}^0 - \alpha_{19}(Mn_u/Si_u - Mn_u^0/Si_u^0) - \alpha_{20}(1/C_{M.з.} - 1/C_M^0) + \Delta m_{ш}, \end{array} \right. \quad (1)$$

де: V – витрата дуття на плавку, нм^3 ; $\alpha_1 - \alpha_{20}$ – коефіцієнти; $m_\sigma, m_u, m_{en}, m_\sigma$ – відповідно маса брукхту, чавуну, вапняку і вапна на плавку, т; Si_u, Mn_u, C_M – вміст силіцію і марганцю у чавуні та вуглецю в металі, %; H – середньоінтегральна за продувку відстань фурменого кінцевика до рівня спокійного металу, калібр; $\Delta V, \Delta m_{en}, \Delta m_\sigma, \Delta m_{ш}$ – поправочні коефіцієнти по витраті дуття, масі вапняку, вапна, і плавикового шпату; K_1, K_2 – коефіцієнти регресії, що уточнюються періодичною корекцією; t_M, t_u – температура металу і чавуну, $^\circ\text{C}$; τ_{II} – тривалість простою конвертера між плавками, год; N – номер плавки за футерівкою; f – функціональні залежності, значення яких наведено в [5]; індекси „0”, „з”, „ш” – позначення відповідно зразкової плавки і заданого значення вихідного параметра.

При знаходженні поправочних коефіцієнтів використовується інформація про помилки на попередніх плавках. Ці помилки сумують з вихідною програмою, виконуючи адаптивне коректування керуючої програми. Помилка визначається після кожної плавки:

$$\varepsilon_i(n) = x_i(n) - x_{is}(n), \quad (2)$$

де n – номер плавки, $x_i \in V, m_\sigma, m_{en}, m_{ш}$.

На основі помилки формується поправка $\Delta x_i(n)$.

Коректування програми в загальному випадку відбувається за формулою:

$$x_i(n) = x_i(n-1) + \Delta x_i(n) = x_i(n-1) + \gamma_i f[\varepsilon_i(n-1)],$$

де γ_i – коефіцієнт підсилення в контурі адаптивного коректування; $\varepsilon_i(n-1)$ – помилка на попередній плавці; f – функція, що визначається помилкою і забезпечує збіжність процесу її мінімізації.

Задача знаходження функції f ускладнюється тим, що вона включає дві складові – регулярну, що пов’язана із поступовими змінами технологічного процесу (зношення футерівки і фурми, зміна хімічного складу вапна і чавуну в міксері та ін.), й випадкову, що пов’язана із різкими змінами технологічного процесу (заміна фурми, виду охолоджуючих ма-

теріалів, злив чавуну з різних міксерів, виплавка сталі різних марок та ін.).

Дослідження процесу показали, що регулярна складова повністю визначається попередньою плавкою, для зменшення негативного впливу випадкової складової адаптація за попередньою плавкою недостатня. Загальний вигляд поправки визначається формулою:

$$\Delta x_i(n) = \beta_1 \Delta x_i(n-1) + \beta_2 \Delta x_{i\phi}(n-1), \quad (3)$$

де β_1, β_2 – вагові коефіцієнти, що визначаються статистично; $\Delta x_i(n-1)$ – поправка до i -го керуючого параметра $(n-1)$ -ї плавки, що визначається як середнеарифметичне значення з поправок у попередніх плавках; $\Delta x_{i\phi}(n-1)$ – фактичне значення поправки із умов отримання на попередній плавці нульової похибки керуючого параметра.

Коефіцієнти β_1 та β_2 визначаємо, мінімізуючи функціонал за масивом із n плавок:

$$\Phi(\beta) = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta x(n)_i - \Delta x(n)_{i\phi}|}{\sum_{i=1}^n |\Delta x(n)_{i\phi}|} \rightarrow \min, \quad (4)$$

при обмеженнях

$$\begin{cases} 0 \leq \beta_m \leq 1; \\ \beta_2 = 1 - \beta_1, \end{cases} \quad (5)$$

де $m \in 1, 2$.

Мінімальна похибка керуючих параметрів „статичної” моделі відповідає значенням вагових коефіцієнтів $\beta_1 = 0, 7$ та $\beta_2 = 0, 3$.

Оперативно коректуються також коефіцієнти регресії K_1, K_2 при параметрах, що мають найбільш тісний зв'язок з керуючими діями. В рівняннях (1) такими параметрами є температура металу і масова частка вуглецю у ньому. Для коректування коефіцієнтів враховуються тільки ті плавки, в яких виконуються рекомендації, а також суттєво змінюється керуючі діями $\Delta V, \Delta m_{en}, \Delta m_e, \Delta m_w$:

Обчислюється зміна керуючого дії на n -й плавці по відношенню до $(n-1)$ -ї, а також викликані цим відхилення вихідних параметрів. Потім розраховується поправка до відповідного коефіцієнту K_1 і K_2 :

$$\Delta K = \frac{n_2 \sum_{j=1}^{n_1} \Delta U_{j+} - n_1 \sum_{j=1}^{n_2} \Delta U_{j-}}{n_2 \sum_{j=1}^{n_1} \Delta x_{j+} - n_1 \sum_{j=1}^{n_2} \Delta x_{j-}}, \quad (6)$$

де ΔK – поправка до коефіцієнту;

n_1, n_2 – кількість плавок з відповідно позитивними і від'ємними відхиленнями вихідних параметрів;

$\Delta U_{j+}, \Delta U_{j-}$ – зміна керуючих параметрів, відповідно з позитивними і від’ємними відхиленнями j -го вихідного параметра;

$\Delta x_{j+}, \Delta x_{j-}$ – відповідно позитивні і від’ємні відхилення j -го вихідного параметра.

В наслідок впливу шумів процесу і похибок у визначенні значень вихідних і керуючих параметрів кількість плавки у такті для уточнення коефіцієнтів рівнянь повинна бути як можна більшою. З іншого боку внаслідок дрейфу характеристик об’єкта ця кількість повинна бути як можна меншою. Дослідженнями, що проведені нами, встановлено, що оптимальна кількість плавки, при якій досягається мінімальна похибка системи дорівнює 15 (рис. 1).

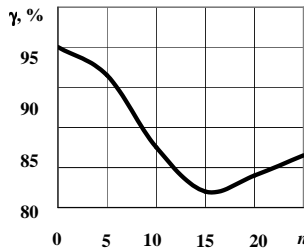


Рис. 1 – Залежність похибки системи γ від кількості плавки n для уточнення коефіцієнтів керування

Можливі два підходи при коректуванні коефіцієнтів:

- 1) коефіцієнти коректуються після кожної плавки;
- 2) в масиві із 15 плавки коефіцієнти K_1, K_2 не змінюються.

При першому підході безперервно коректується масив шляхом видалення з нього першої плавки і включення останньої. Перший підхід заслуговує на більшу увагу, але потребує більшого об’єму розрахунків. Таке ж значення n використовується при знаходженні $\Delta x_i(n - 1)$ у (3).

Із допущень, що зроблені в (1) з урахуванням фізико-хімічних властивостей процесу, випливає, що коефіцієнти при вихідних параметрах можуть змінюватися у визначених межах. Якщо при настройці буде визначено, що коефіцієнти повинні прийняти значення, що виходять за межі інтервалу, то установлюють значення коефіцієнтів, відповідної межі.

Модель керування пройшла промислове випробування на 350-т конвертерах ВАТ Металургійний комбінат „Азовсталь”, і рекомендована до впровадження.

Висновки

Запропоновано і досліджено підхід до побудови математичної моделі технологічного процесу, що заснований на спільному використанні детермінованих, ймовірнісних і евристичних методів з наступною іденти-

фікацію моделі у процесі експлуатації за плавками позитивного досвіду („зразковими”).

Підхід перевірено на створенні моделі „статичної” системи керування конвертерною плавкою. Промислова перевірка моделі показала суттєве поліпшення керування.

Подальші дослідження будуть проводитись у напрямку розробки АСКТП конвертера.

Література

1. 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.
2. Бойченко Б.М., Охотським В.Б., Харлашин П.С.: Підручник / Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія). – Дніпропетровськ: РВА „Дніпро-ВАЛ”, 2004. – 454 с.
3. Бигеев А.М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали. – Челябинск: Metallurgia, 1988. – 480 с.
4. Баптизманский В.И., Меджибожский В.Я., Охотский В.Б. Конвертерные процессы производства стали. Теория, технология, конструкции агрегатов. – К. – Донецк: Вища школа, 1984. – 344 с.
5. Богушевский В.С., Рюмшин Н.А., Сорокин Н.А. АСУТП производства стали в конвертерах. – К.: Техніка, 1991. – 180 с.
6. Богушевский В.С., Рюмшин Н.А., Сорокин Н.А. Основы математического описания технологических процессов конвертерного производства стали. К.: НПО „Киевский ин-т автоматки”, 1992. – 168 с.
7. Компьютерная модель расчета шихтовки и продувки конвертерной плавки / В.С. Богушевский, Г.Г. Грабовский, В.М. Михайлов и др. // Сталь. - 2006. - 1. - С. 18 - 21.

Отримано 08.12.2009 р.