

УДК 669 (075.4)

К.О. Сергеева, С.В. Жук, К.П. Грабівський, К.В. Жердєв*Національний технічний університет України «КПІ»***КРИТЕРІЙ ОПТИМАЛЬНОСТІ ЯКОСТІ КЕРУВАННЯ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОЮ ПЛАВКОЮ**

Розроблений комплексний критерій оптимального керування киснево-конвертерною плавкою. Визначено вплив початкових умов на попадання плавки в межі задані маркою сталі. Отриманні чисельні значення цільової функції оптимального керування з мінімізацією собівартості сталі.

Ключові слова: конвертер, критерій, керування.

Форм. 6. Літ. 5.

К.А. Сергеева, С.В. Жук, К.П. Грабовский, К.В. Жердев**КРИТЕРИЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКОЮ**

Разработан комплексный критерий оптимального управления кислородно-конвертерной плавкой. Определено влияние начальных условий на попадание плавки в границы заданные маркой стали. Получены численные значения целевой функции оптимального управления с минимизацией себестоимости стали.

Ключевые слова: конвертер, критерий, управление

K. Sergeeva, S. Zhuk, K. Grabovskij, K. Zherdev**CRITERION OF OPTIMALITY QUALITY OF CONTROL BOF**

Application of developed complex optimal control BOF. The influence of the initial conditions on the verge of falling in melting specified grade of steel. The received numerical value of the objective function of optimal control minimizing the cost of steel.

Keywords: converter, criterion, control.

Вступ. За останні роки спостерігається стійка тенденція до зниження собівартості киснево-конвертерної сталі, що є наслідком освоєння проектної потужності агрегатів, подальшого вдосконалення технологічного процесу, підвищення стійкості футерівки конвертерів, використання засобів механізації, автоматизації технологічного процесу та керування ним. АСКТП конвертерної плавки забезпечує високовиробничу роботу агрегатів, отримання сталі заданого складу та температури, економні витрати матеріалів та кисню.

Критерій якості керування необхідний для розробки оптимального алгоритму керування процесом. Такий алгоритм від множини інших буде відрізнятися тим, що забезпечить екстремальне значення критерію якості керування [1, 2].

Матеріали і методика експерименту. Якісті критерію оптимальності можуть бути обрані різноманітні технічні та економічні показники. Задача пошуку критерію досить складна та визначається специфічними умовами, характерними для конкретного об'єкту. При цьому іноді виявляється, що відомі показники процесу – продуктивність, економічність, якість продукції – можуть бути в протиріччі один з одним. Тому необхідно або віднайти комплексний критерій оптимальності, що враховує всі ці характеристики, чи вибрати у якості критерію одну з них, але з обмеженнями інших характеристик.

Цільова функція включає розраховані на одиницю маси придатної сталі складові її собівартості від затрат на матеріали, енергоресурси, футерівку конвертера і працю, що виражені лінійною функцією від початкових умов і керуючих діянь [3]:

$$I = (\alpha_0 + \sum_{i=0}^n \alpha_i x_i) / (\beta_0 + \sum_{i=0}^n \beta_i x_i), \quad (1)$$

$x_i \in m_{\text{б}}, m_{\text{ч}}, m_{\text{впн}}, m_{\text{вж}}, m_{\text{шж}}, V, \text{Si}_{\text{ч}}, \text{Mn}_{\text{ч}}, \text{S}_{\text{ч}}, t_{\text{ч}}, t_{\text{з}}, C_{\text{з}}, N, \tau_{\text{п}}, \tau_{\text{впн}}, \tau_{\text{вж}}, \tau_{\text{шж}}, \tau_{\text{тп}}, H, v, \text{Mn}_{\text{с}}, \text{Si}_{\text{с}}, C_{\text{с}}, S_{\text{с}}, P_{\text{с}}, m_{\text{FeMn}}, m_{\text{FeSi}}, m_{\text{SiMn}}$.

де I – функціонал питомої собівартості сталі C_y , грн_/т; x_i – параметри початкових умов і керуючих діянь; α_0 – вільний член, який включає загальнозаводські (умовно - постійні) витрати, які не залежать від керуючих діянь, грн; α_i - коефіцієнти; n - число параметрів, які враховуються;

β_0, β_1 – коефіцієнти; $m_b, m_{\text{ч}}$ – відповідно маса брухту і чавуну на плавку, т; $m_{\text{вп}j}, m_{\text{в}j}, m_{\text{ш}j}$ – маса, т, вапняку, вапна та шпату в j - у добавку в момент часу від початку продувки τ_j , хв; V – об'єм кисню на плавку, м³; $\text{Si}_{\text{ч}}, \text{Mn}_{\text{ч}}, \text{S}_{\text{ч}}$ – вміст силіцію, марганцю та сірки в чавуні, %; $t_{\text{ч}}, t_{\text{с}}$ – відповідно температура чавуну та температура металу згідно заданої марки сталі, °С; $C_{\text{с}}$ – заданий вміст вуглецю у сталі, %; $\tau_{\text{п}}$ – тривалість плавки, хв.; H – висота підняття фурми, м; v – інтенсивність продувки, м³/хв.; N – номер плавки по кампанії футерівки конвертера; $\tau_{\text{тп}}$ – тривалість продувки, хв.; $S_{\text{с}}, P_{\text{с}}$ – допустимі значення масових часток сірки і фосфору в сталі, які визначаються її маркою, %; $\text{Mn}_{\text{с}}, \text{Si}_{\text{с}}, C_{\text{с}}$ – точки прицілу по масовим часткам марганцю, силіцію та вуглецю в сталі, %; $m_{\text{FeMn}}, m_{\text{FeSi}}, m_{\text{SiMn}}$ – маса на плавку відповідно феромарганцю, феросиліцію і силікомарганцю, т.

Основою статичного керування конвертерною плавкою є розрахунок керуючих діянь до початку продувки. Невірно розраховані діяння призводять до необхідності проведення коректувань за наступними режимами:

а) додувки:

- 1) при нормальному положенні фурми;
- 2) те ж з переводом на іншу марку сталі;
- 3) при високому положенні фурми;
- 4) те ж з переводом на іншу марку сталі;

б) охолодження:

- 1) з додувкою;
- 2) те ж з переводом на іншу марку сталі.

При статичному керуванні плавкою критерій як функцію керуючих діянь можна представити у вигляді суми ймовірностей додувки, охолодження після першої повалки та проведення коректуючих операцій з переводом плавки на іншу марку сталі

$$\begin{aligned}
 I(m_{\text{бр}}, m_{\text{в}}, m_{\text{вп}}, V, v_{\text{сп}}, \bar{H}) = & \alpha_1 P[(t_1 \leq t_{\text{м}} < t_3), (C_{\text{м}} > C_3), \\
 & (S_{\text{м}} \leq S_1)] + \alpha_2 P[(t_2 \leq t_{\text{м}} < t_1), (C_1 \leq C_{\text{м}} \leq C_3), (S_1 \leq S_{\text{м}} < S_2)] + \\
 & + \alpha_3 P[(C_{\text{м}} < C_2), (t_1 \leq t_{\text{м}} \leq t_3), (S_{\text{м}} \leq S_1)] + \alpha_4 P[(t_{\text{м}} \leq t_2), \\
 & (C_{\text{м}} \leq C_3), (S \leq S_2)] + \alpha_5 P[(t_{\text{м}} > t_3), (C_{\text{м}} > C_3), \\
 & (S_1 \leq S_{\text{м}} < S_2)] + \alpha_6 P[(t_{\text{м}} > t_3), (C_{\text{м}} \leq C_2), (S_{\text{м}} > S_2)], \quad (2)
 \end{aligned}$$

де $v_{\text{сп}}, \bar{H}$ – середньоінтегральне значення відповідно інтенсивності дугтя, м³/хв і положення фурми над рівнем спокійного металу, калібр;

$\alpha_1 \dots \alpha_6$ – вагові коефіцієнти;

t_1, t_3 – відповідно нижня та верхня межі температури металу при зливі з конвертера, °С;

C_1, C_3 – відповідно нижня та верхня межа по вмісту вуглецю в металі при зливі з конвертера, %;

S_1 – верхня межа по вмісту сірки у металі, %;

t_2, C_2, S_2 – межі відповідно температури, вмісту вуглецю та сірки після першої повалки, що потребують проведення коректуючих операцій з переводом плавки на іншу марку сталі [4].

Тут вираз з коефіцієнтом α_1 характеризує вірогідність додувки на вуглець відповідно режиму додувки при нормальному положенні фурми. Вираз з коефіцієнтом α_2 характеризує вірогідність додувки на вуглець відповідно режиму додувки при переводі на іншу марку сталі, з коефіцієнтом α_3 – вірогідність додувки при високому положенні фурми, α_4 – додувка по сірці при переведенні на іншу марку сталі, α_5 – охолодження з додувкою, α_6 – охолодження з переводом на іншу марку сталі.

Критерій (2) апроксимуємо виразом:

$$I(m_{\text{бр}}, m_{\text{в}}, m_{\text{вп}}, \tau_{\text{в}}, \tau_{\text{вп}}, v, H) = \alpha_7 M (C_{\text{м}} - C^*)^2 +$$

$$+ \alpha_8 M (t_m - t^*)^2 + \alpha_9 M (S_m - S^*)^2, \quad (3)$$

де $\alpha_7, \alpha_8, \alpha_9$ – коефіцієнти, що визначаються масштабами змінних, що входять у критерій, а також залежать від співвідношення частот додувок через непопадання по вуглецю, температурі та сірці відповідно;

M – математичне сподівання;

S^*, t^*, S^* – “точки прицілу” по вуглецю, температурі та сірці в металі, що визначаються методом експертних оцінок в залежності від виплавляємої марки сталі й технологічної ситуації на початку плавки (наявність замовлення, готовність і стан сталерозливного ковша, майданчика та установки позапічної обробки та ін.).

Обмеження по критерію мають вигляд:

– завантаження заданої маси металошихти в конвертер $m_m = f(m_{бр} + m_ч)$; (сума мас чавуну та брухту у конвертері повинна дорівнювати ємності конвертера);

– збільшену переробку брухту $0 \leq \sum_{j=1}^l m_{внj} \leq 0,5$; (засипати вапна не більше 0,5 тони, щоб не переохолодити метал);

– належну масу шлаку $\sum_{j=1}^p m_{вj} \geq m_в$;

– економію плавикового шпату $\sum_{j=1}^q m_{шj} \leq 1,5$;

– окиснення необхідної кількості вуглецю, кремнію та мангану $V_{\phi} \geq V$;

– підтримання висоти фурми над рівнем спокійного металу в межах, що вказані технологічною інструкцією, $H_{\min} \leq H \leq H_{\max}$;

– проектну продуктивність конвертера $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$ (із збільшенням інтенсивності подання кисню збільшується продуктивність і менше часу триває продувка);

– засвоєння ванною сипких матеріалів $0,9 \tau_{пр} \geq \tau_{вп} \geq 0,5 \tau_{пр}$ та $\tau_в \leq 0,4 \tau_{пр}$.

Якість вирішення будь-якої задачі оптимізації залежить у першу чергу від того, наскільки правильно вибраний критерій, а при байесовському підході якість критерію визначається ступенем близькості до реальної функції втрат. Для її побудови можна використовувати експертні оцінки за методом послідовних інтервалів [5].

Апріорі можна припустити, що частота корекцій за окремими компонентами не є постійною, а залежить від початкових умов плавки. Так, якщо поставлена задача отримати марку сталі з високим вмістом вуглецю з першої повалки, то масштаб коефіцієнта α_7 критерію (3.7) підвищується при інших рівних умовах, аналогічно підвищуються масштаби коефіцієнта α_8 при не збалансуванні плавки по теплоті і коефіцієнта α_9 при необхідності видалити значну кількість сірки (високий вміст сірки в чавуні і низький вміст її в сталі).

Нами було визначено вплив початкових умов на потрапляння плавки у задані межі. Для цього розраховані імовірності появи наступних подій NC – додувки на вуглець, NQ – нагріву, NT – охолодження, NS – додувка на видалення сірки.

Рівняння множинної регресії має вигляд

$$NC = 13,3 + 22C_ч - 11,2Si_ч + 22,9Mn_ч - 2070 P_ч + 130C_3 + 16,8(S_ч - S_3)/S_3 - 2,98V_{\Pi} + 0,000114Q_{\Pi}, \quad (4)$$

Коефіцієнти множинної кореляції $R = 0,673$; середньоквадратичне відхилення $\sigma = 14,2$ %; достовірність коефіцієнта кореляції $P > 0,950$.

Відповідно

$$NQ = 134 + 41,5C_ч - 7,45Si_ч - 16,2Mn_ч + 46,6P_ч - 84,6C_3 - 38,3(S_ч - S_3)/S_3 - 2,05V_{\Pi} - 0,000121Q_{\Pi}; \quad (5)$$

$$R = 0,667; \sigma = 14,4 \%; P > 0,950.$$

$$NT = -1,52 - 10,9C_ч - 22,8Si_ч + 26,4Mn_ч - 568P_ч + 0,51C_3 + 27,9(S_ч - S_3)/S_3 + 1,61V_{\Pi} + 0,000152Q_{\Pi};$$

$$R = 0,787; \sigma = 12,9 \%; P > 0,950.$$

$$NS = -6,89 - 16,7C_ч - 36,1Si_ч - 5,49Mn_ч + 98,4P_ч +$$

$$+ 110C_3 + 11,6(S_4 - S_3)/S_3 + 4,42V_{II} - 0,000111Q_{II}; \quad (6)$$

$$R = 0,685; \sigma = 10,7 \%; P > 0,950.$$

Тут V_{II} і Q_{II} відповідно значення кисневого, м³/т металошихти, і теплового потенціалу ванни, кДж/т.

Чим менша величина NC , NQ , NT , NS , тим менша імовірність того, що потрібно буде коректувати плавку.

Якщо, наприклад, NS маленьке у порівнянні з іншими, то у рівнянні (3) коефіцієнт, який відповідає за вміст сірки α_9 , грає саму маленьку роль. Якщо на поточній плавці співвідношення ймовірностей інше, то і коефіцієнти α_7 , α_8 , α_9 будуть інші. Тобто в кожній плавці перед розрахунком оптимальних керуючих діянь по параметрам режиму дугтя визначаються конкретні значення цих коефіцієнтів.

Внаслідок того, що параметри NQ і NT зв'язані з необхідністю коректування плавки по температурі (відповідно нагрів чи охолодження), то коефіцієнт α_8 визначається для найбільшого параметра.

Поняття економічності процесу обмежимо розглядом питання про вихід сталі, що визначається як відношення рідкої сталі до маси металевих шихти, що загрузається в конвертер. Цей показник у конвертерній плавці має дуже важливе значення. Зменшення маси металевих ванни за час плавки пов'язано не тільки з окисненням домішок чавуну, що є метою конвертерного процесу, але й з втратою частини заліза, що пояснюється окисненням заліза з переходом його у шлак, випаровуванням заліза з утворенням бурого диму, викидами металу з конвертера та виносом металу, який зазвичай має місце на початку продувки при відсутності достатнього шлакового покриву. Дві останні статті витрат заліза необхідно зводити до мінімуму; кількість заліза, що переходить у шлак, повинна підтримуватись на оптимальному рівні, що визначається умовами шлакоутворення та видалення фосфору. Що стосується витрат заліза з димом у вигляді дисперсних частинок, то при існуючій технології конвертерної плавки немає ефективних способів їх зниження.

Таким чином, мінімізація витрат заліза пов'язана з умовами шлакоутворення (через винос металу) та з обмеженням швидкості окиснення вуглецю (через викиди). Необхідно підкреслити, що зв'язок між викидами металу та швидкістю зневуглицювання ще не встановлено достатньо повно та потребує додаткових досліджень.

Встановлення критерію оптимальності для конвертерного процесу можливо лише при умові проведення великої роботи по дослідженню техніко-економічних характеристик та взаємозв'язків. На практиці обмежуються вимогами до вихідних параметрів металу, особливо до температури та вмісту вуглецю. Для оцінки якості керування процесу зі сторони оператора або обчислювальної машини використовують два тісно пов'язаних між собою критерії:

1) стандартне (середньоквадратичне) відхилення отриманих значень вихідних параметрів від заданих;

2) частоту (ймовірність) попадання значень вихідних параметрів в задану область.

Найкращою формою критерію якості керування є збитки в гривнях, отримані в результаті неоптимального керування плавкою. Сума збитків за визначений період часу або за визначену кількість плавок може характеризувати якість керування процесом.

Висновки. Вдосконалено критерій статичного та динамічного керування плавкою, що забезпечує мінімізацію собівартості сталі за рахунок зниження кількості коректуючих операцій. Запропоновано новий підхід до визначення масштабних коефіцієнтів цільової функції, що полягає у визначенні впливу на неї окремих коректуючих операцій.

Вдосконалено критерій замкненого керування плавкою, що забезпечує побудову нової траєкторії керування при відхиленні від оптимальних процесів зневуглицювання, нагріву та окисненості ванни та повернення процесу до старої траєкторії при керуванні процесів шлакоутворення.

Запропоновано новий підхід до побудови цільової функції критерію оптимального керування з мінімізацією собівартості сталі, що полягає у розподіленні параметрів на три групи – витратних на плавку матеріалів, початкових та кінцевих умов плавки, а також керуючих параметрів, не пов'язаних явно із собівартістю сталі, з подальшою ідентифікацією функції в кожній групі окремо. Отримані чисельні значення цільової функції оптимального керування з мінімізацією собівартості сталі.

1. Туркенич Д.И. Управления плавкой стали в конверторе. – М.: Металлургия, 1971. – 360 с.
2. В.С. Богушевский, Л.Ф. Литвинов, Н.А. Рюмшин, В.В. Сорокин Математические модели и системы управления конверторной плавкой. – К.: НПО “Киевский институт автоматики”, 1998. – 304 с.
3. Богушевский В.С. Критерий оптимального управления конвертерной плавкой / В.С. Богушевский, Н.А Сорокин, А.Г. Миски-Оглу // Автоматизация производственных процессов. – 1995. – 1. – С. 56-65.
4. Богушевський В.С., Автоматизована система керування конверторною плавкою / В.С. Богушевський, К.О. Сергєєва, С.В. Жук // Вісник НТУУ «КПІ». - К.: НТУУ «КПІ», 2011.- № 61 Т2. – С. 147 – 151 – (Серія Машинобудування).
5. Богушевський В.С. Система прийняття рішень при керуванні / В.С. Богушевський, В.Ю. Сухенко, К.О. Сергєєва киснево-конвертерною плавкою // Нові технології. – 2009. – № 1. – С. 98 – 101.

Стаття надійшла до редакції 11.02.2014.