

Ми представляємо модель контролю температурного режиму ванни конвертера на основі теоретичного обґрунтування кінетичних процесів окиснення домішок металу і розчинення охолоджуючих матеріалів з аналізом процесів теплообміну, що проходять при цьому як складові замкнутої системи керування

Ключові слова: модель, конвертер, металева ванна, температурний режим

Мы представляем модель контроля температурного режима ванны конвертера на основе теоретического обоснования кинетических процессов окисления примесей металла, и растворения охлаждающих материалов с анализом процессов теплообмена, которые проходят при этом как составляющие замкнутой системы управления

Ключевые слова: модель, конвертер, металлическая ванна, температурный режим

ЗАМКНУТА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ

В.С. Богушевський

Доктор технічних наук, професор*

Контактний тел.: (044) 238-73-67, (044) 433-39-61

К.М. Зубова

Аспірант*

Контактний тел.: 093-607-12-75, (044) 238-73-67

E-mail: katerinkazubowa@ukr.net

В.Ю. Сухенко

Кандидат технічних наук, асистент*

Контактний тел.: (044) 238-73-67, (044) 576-41-58

*Кафедра фізико-хімічних основ технології металів

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

вул. Політехнічна, 35, м. Київ, Україна, 03056

Вступ

Температура металу на випуску плавки з конвертера є найважливішим параметром, що визначає успішне його розливання. Особливо це стосується конвертерних цехів, в яких відсутні агрегати позапільної обробки металу або в цих агрегатах відсутня можливість коректування температури. Достатньо вузький діапазон по кінцевій температурі металу, що не перевищує 20⁰С, вимагає точного розрахунку керуючих діянь, як теплоносіїв, так і охолоджувачів. Існуючі системи керування температурою, що засновані на порівнянні дійсної температури зі заданою, мають суттєву ваду у визначенні дійсної температури [1–3].

При цьому неважливо, яким чином вимірюється температура прямим методом (зондом, що занурюється [4]), чи непрямим (характеристиками теплового навантаження фурми, кесона тощо [5–6]). Це пов'язано з тим, що в існуючих моделях ігнорується кінетика теплообмінних процесів у ванні. В результаті системи працюють у дорадчому (розімкненому) режимі, коли рішення про керуючі діяння приймає людина.

Таким чином, використання відомих систем призводить до неоптимального керування температурою конвертерної плавки.

Наведені в статті дослідження проводились в Національному технічному університеті України «КПІ» по темі «Математичні моделі й алгоритми системи управління кисневим конвертером» державний реєстраційний номер 0110U002880.

Постановка задачі

Метою досліджень є створення моделі контролю температурного режиму ванни конвертера на основі теоретичного обґрунтування кінетичних процесів окиснення домішок металу і розчинення охолоджуючих матеріалів з аналізом процесів теплообміну, що проходять при цьому як складові замкнутої системи керування.

Результати досліджень

Процеси масо- та теплообміну у сталеплавильній ванні аналогічні. Із використанням експериментальних даних і співвідношень теорії подібності, що дозволяють на основі моделювання знайти загальний вигляд рішення без інтегрування диференціальних рівнянь, отримане критеріальне рівняння переносу при розвинутій турбулентності потоку для внутрішньої задачі в круговому циліндрі (формула Крауссольда) з гідродинамічною поправкою, що викликана осциляцією рухливої рідини:

$$St = k_1 k_2 [Re(1+\epsilon)]^{0,8} Pr^{0,35}, \quad (1)$$

де St – критерій Стентона ($St \in St_{e,m}, St_T$); $St_{e,m} = DH_{e,m}/w$ – ефективний масообмінний критерій Стентона, $St_T = \lambda N_T / (c\rho w)$ – теплообмінний критерій Стентона; k_1 – коефіцієнт рівняння при розвинутій турбулентності потоку для внутрішньої задачі в круговому циліндрі (формула Крауссольда) з гідродинамічною поправкою, що викликана осциляцією рухливої рідини; k_2 – коефіцієнт, що вра-

ховує вплив хімічних реакцій ($k_2 \in k_{2M}, k_{2T}$); $k_{2M} = 0,5$ – масопереносу при гіпотетично прийнятих однакових значеннях опору хімічних та дифузійних ланок, $k_{2T} = 1$ – теплопереносу; Re – критерій Рейнольдса, $Re = wd / \nu$; ϵ – відносна амплітуда швидкості потоку (міра пульсацій), $\epsilon = W_1 / W$; Pr – критерій Прандтля ($Pr \in Pr_M, Pr_T$); $Pr_M = \nu / D$ – масообмінний критерій Прандтля (критерій Шмідта); $Pr_T = \nu / a$ – теплообмінний критерій Прандтля.

Тут D – коефіцієнт молекулярної дифузії кисню у ванні, m^2/c ; $H_{e.M}$ – відносна ефективність масопереносу, $H_{e.M} = \beta_e / D$; β_e – ефективний коефіцієнт масопереносу у ванні, m/c ; λ – коефіцієнт теплопровідності, $Вт/(м \cdot К)$; H_T – відносна ефективність теплообміну, $H_T = a / \lambda$, α – коефіцієнт теплообміну у ванні, $Вт/(m^2 \cdot К)$, c – середня питома теплоємність, $Дж/(кг \cdot К)$; ρ – щільність рідини, $кг/м^3$; w – середня за продукву швидкість циркуляції ванни, m/c ; d – внутрішній діаметр циліндричної частини футерівки конвертера, m ; ν – кінематична в'язкість емульсованої ванни, m^2/c ; W – повздовжній компонент швидкості рідини, m/c ; W_1 – амплітуда першої головної гармоніки швидкості потоку, m/c ; a – коефіцієнт температуропровідності, m^2/c .

Відомо, що в пульсуючому потоці робочого тіла в режимі біжучої хвилі через дію механізму акустичної хвильової природи при малих збуреннях (лінійне наближення) від впливу коливальної складової швидкості переноситься тільки енергія, а масопотік відсутній, тобто при розрахунку $St_{e.M}$ приймаємо $\epsilon = 0$.

Нами визначені числові значення коефіцієнтів переносу в конвертерній ванні по формулі (1) із врахуванням теплофізичних даних [7]: $\beta_e = 0,04 \cdot 10^{-3} m/c$ та $\alpha = 15,2 \cdot 10^3 Вт/(m^2 \cdot К)$. Порівнюючи знайдені коефіцієнти з даними [8], можна сказати, що значення β_e та α попадають в рекомендовані інтервали вимірювання.

Коливання ванни знижують опір переносу теплоти. Розрахунок показує, що позитивний вклад у процес теплопереносу у ванні від гідродинамічного осцилюючого ефекту складає 6%, що дає можливість в металошихті збільшити на 1,5% масову частку брукхту, що перероблюється (чи на 6,4% масу брукхту).

Приведемо функціонали кінетичної моделі перехідних процесів від збурюючих впливів на температуру ванни відповідно брукхту $m_{бр}$, добавки j -го матеріалу m_j (вапна, вапняку, плавикового шпату) та R -го елемента ванни (вуглецю, силіцію, мангану, фосфору).

$$\Delta\tau_{nRt} = 10^3 cm_c / [60\lambda H_T F_{eM} (R_c - \gamma R_M)], \quad (2)$$

де $\Delta\tau_{nRt}$ – питома значення внеску в постійну часу перехідного процесу в ванні від теплової дії при окисненні R -го елемента, хв./т; m_c – маса чавуна, т; F_{eM} – площа поверхні контакту з металевою емульсією, m^2 ; R_c, R_M – вміст R -го елемента ванни відповідно в чавуні й металі ванни, т; γ – коефіцієнт, що характеризує вигар метала.

Як видно з (2) теплові й масообмінні процеси ідентифікуються типовими інерційними ланками першого порядку з визначеними коефіцієнтами передачі й постійними часу. При такому підході деякі складові мають свої особливості. Зокрема, окиснення вуглецю складається з двох кінетичних періодів – нуль мірного

(пропорційна ланка із постійною часу, що дорівнює нулю) й інерційного, мангану й заліза – з трьох, зокрема двох інерційних на початку й в кінці продувки і нуль мірного в середині, процес плавлення брукхту залежить від його насипної щільності з різними постійними часу для легковагового T_8 , середньовагового T_9 і вагового T_{10} [9].

На особливу увагу заслуговує дослідження теплової роботи футерівки. Кисневі конвертери є агрегатами з циклічним режимом роботи (простой-продувка). Це обумовлює періодичний характер теплової роботи футерівки. У відповідності з дослідженнями, що проведені нами (рис. 1), температура вогневої поверхні футерівки (яка контактує з металом), незважаючи на велику теплову інерцію вогнетривкого матеріалу, активно реагує на зміну температури середовища. Ці діяння, що постійно повторюються, при ритмічній роботі агрегату викликають низькочастотну гармонійну складову температурного поля футерівки з періодом коливань, що дорівнює середній тривалості плавки. Для її знаходження необхідно вирішити диференціальне рівняння теплопровідності для напівобмеженої плоскої стінки з граничною умовою першого роду, що періодично змінюється.

$$\begin{cases} \frac{1}{60} \frac{\partial(\Delta\tau)}{\partial\tau} = a_\phi \frac{\partial^2\tau}{\partial x^2}, (\tau > 0, 0 \leq x \leq \infty); \\ \Delta t|_{x=0} = 0; \\ \Delta t|_{x=0} = \Delta t_*|_{x=0} \cos 2\pi \frac{\tau}{\tau_{пл}}; \\ \frac{\partial(\Delta t)}{\partial x}|_{x \rightarrow \infty} = 0; \\ \Delta t|_{x \rightarrow \infty} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де Δt – поточне значення періодичної складової температури футерівки по ходу плавки, 0C ; τ – поточний час плавки, що відраховується від початку простою, хв.; $\Delta t|_{x=0}$ – поточне значення періодичної складової температури на вогневій поверхні футерівки по ходу плавки, 0C ; $\Delta t_*|_{x=0}$ – амплітуда коливань температури на вогневій поверхні, що дорівнює піврізниці середніх за кампанію температур готового металу й чавуна.

Рішення системи (3) має вигляд [10]

$$\Delta t = \Delta t_*|_{x=0} \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{Fo_x}}\right) \cos\left(2\frac{\tau}{\tau_{пл}} - \sqrt{\frac{\pi}{Fo_x}}\right), \quad (4)$$

де $Fo_x = 60a_\phi \bar{\tau}_{пл} / x^2$ – критерій Фур'є, що варіюється за просторовою координатою x .

Виходячи з вищенаведеного, теплові втрати на акумуляцією футерівкою наближено описуються типовою інерційною ланкою другого порядку.

Наші дослідження також показали, що вплив добавок вапна на температуру ванни залежить не тільки від маси останнього й також від моменту його введення [11], тобто коефіцієнт передачі є змінним і залежить від часу, що відраховується від початку продувки τ_b відносно її тривалості $\tau_{пл}$. Чим пізніше вводять у ванну вапно, тим менше проявляється його охолоджуюча дія. Це пов'язано з тим, що добавки вапна, які подаються пізніше у нагріту ванну, повністю беруть участь в шлакоутворенні, що йде з виділенням теплоти.

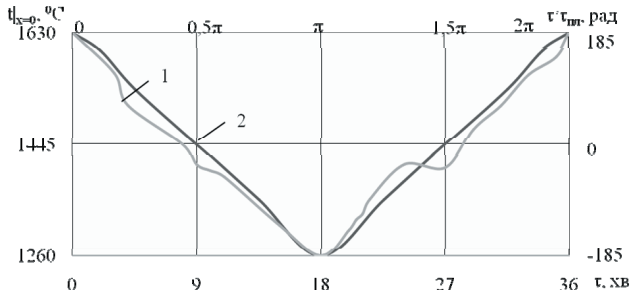


Рис. 1. Зміна температури внутрішньої поверхні смолодоломітової футерівки 160-тонного конвертера: 1 – викликана охолодженням протягом простою ($\tau = 0 - 18$ хв.) і нагрівом протягом продувки ($\tau = 18 - 36$ хв.) для плавки в середині кампанії; 2 – апроксимація виразом $\Delta t|x = 0$ із системи (3)

Такий самий характер залежності спостерігається при дослідженні впливу на температуру ванни моменту введення вапняку $\tau_{вп}$. Охолоджуючий ефект останнього складається із фізичної й хімічної частини. Якщо вапняк вводять у ванну пізно, то хімічне розкладення його відбувається неповністю, що зменшує його охолоджуючий ефект.

Рівняння кінетики, що ідентифіковані за експериментальними даними наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри теплових процесів конвертерної ванни

№ пп	Теплоносії	Структурна схема	Коефіцієнт передачі, °C/т	Стала часу, хв./т
1	Вуглець	$k_{1C} \rightarrow \frac{k_{2C}}{T_1 P + 1}$	$k_{1C} = 84,84$ $k_{2C} = 87,95$	$T_1 = 2,75$
2	Силіцій	$\frac{k_{Si}}{T_2 P + 1}$	$k_{Si} = 168,57$	$T_2 = 1,28$
3	Манган	$\frac{k_{1Mn}}{T_3 P + 1} \rightarrow \frac{k_{2Mn}}{T_4 P + 1}$	$k_{1Mn} = 49,28$ $k_{2Mn} = 47,04$ $k_{3Mn} = 44,81$	$T_3 = 1,62$ $T_4 = 1,33$
4	Фосфор	$\frac{k_P}{T_5 P + 1}$	$k_P = 256,63$	$T_5 = 25$
5	Залізо	$\frac{k_{1Fe}}{T_6 P + 1} \rightarrow \frac{k_{2Fe}}{T_7 P + 1}$	$k_{1Fe} = 30,68$ $k_{2Fe} = 30,68$ $k_{3Fe} = 30,68$	$T_6 = 1,69$ $T_7 = 1,33$
6	Брухт	$\frac{k_{1B}}{T_8 P + 1} \rightarrow \frac{k_{2B}}{T_9 P + 1} \rightarrow \frac{k_{3B}}{T_{10} P + 1}$	$k_{1B} = -9,36$ $k_{2B} = -9,36$ $k_{3B} = -9,36$	$T_8 = 0,15$ $T_9 = 0,20$ $T_{10} = 0,25$
7	Вапняк	$\frac{k_{вп}}{T_{11} P + 1}$	$k_{вп} = -32,97 + 20\tau_{вп} / \tau_{п}$	$T_{11} = 0,88$
8	Ванно	$\frac{k_v}{T_{12} P + 1}$	$k_v = -17,7 + 6,56\tau_{вп} / \tau_{п}$	$T_{12} = 0,46$
9	Плавковий шпигат	$\frac{k_{шпг}}{T_{12} P + 1}$	$k_{шпг} = -15,9$	$T_{12} = 0,42$

Керуючі діяння вибираються шляхом мінімізації критерію вигляду

$$I(V, \bar{H}, m_j) = \sum_{j=1}^k a_j M(L_j - L_j^*)^2, \quad (5)$$

де I – функціонал, що мінімізують; V – витрати дуття на плавку, m^3 ; \bar{H} – середньоінтегральне положення фурми, м; α^j – коефіцієнти, що визначають важливість точності досягнення j -ї характеристики сталі у момент повалки конвертера; M – математичне сподівання; L_j, L_j^* – фактичне й задане значення j -ї характеристики сталі.

Для реалізації (5) фактичне значення температури обов'язково коректується за визначеними кінетичними характеристиками перехідних процесів конвертерної ванни.

Висновки

1. Теоретичне й експериментальне дослідження теплових процесів конвертерної ванни показало, що як тепловідлення від окиснення домішок чавуну, так і тепловтрати від введення брухту, шлакоутворюючих й охолоджуючих матеріалів, а також акумуляція тепла футерівкою – інерційні процеси, тому пряме й непряме визначення температури ванни не можливо використовувати без урахування кінетики теплових процесів.

2. Визначені характеристики перехідних процесів окремих складових теплового режиму введені в модель динамічного контролю температури ванни конвертера [12]. Дослідження за експериментальними даними в умовах діючого виробництва показало доцільність використання підходу, що викладений в статті.

3. Подальші дослідження будуть проводитись в напрямку розповсюдження кінетичного підходу до інших складових конвертерного процесу – зневуглючення ванни, шлакоутворення тощо.

Література

1. Математические модели и системы управления конвертерной плавкой / В. С. Богушевский, Л. Ф. Литвинов, Н. А. Рюмшин, В. В. Сорокин. – К.: НПК „Київський інститут автоматики”, 1998. – 304 с.
2. Богушевський В. С. Контроль температурного режиму конвертерної плавки / В. С. Богушевський, К. О. Сергєєва // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2009. – № 6. – С. 75 – 80.
3. Богушевський, В. С. Розрахунок металевої частини шихти киснево-конвертерної плавки / Богушевський В. С., Сухенко В. Ю., Сергєєва К. О., Жук С. В. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 7. – С. 266 – 269.
4. Богушевський, В. С. Управление доводкой конвертерной плавки / Богушевський В. С., Сухенко В. Ю., Сергєєва Е. А. // Металл и литье Украины – 2010. – № 3. – С. 14 – 17.
5. Богушевський, В. С. Методи вимірювання температури сталі у конвертері / Богушевський В. С., Сергєєва К. О. // Наукові нотатки. – 2011. – № 1. – С. 90 – 96.
6. Богушевський, В. С. Математична модель і система керування режимом дуття конвертерної плавки / Бо-

- богушевський В. С., Сухенко В. Ю., Шматко О. В.// Вісник НТУУ „КПІ”, серія Машинобудування. – 2011. – № 61, т. 2. – С. 38 – 43.
7. Богушевський, В. С. Теплообмен холодной металлозагрузки с расплавом в ванне печи / Богушевський В. С., Сорокин Н. А., Лигоцкий И. Л.// Изв. АН СССР. Металлы. – 1989. – № 3. С. 15 – 20.
8. Кноре, Д. Г. Физическая химия: учеб. пособ / Кноре Д. Г., Крылова Л. Ф., Музыкантов В. С. – М.: Высшая школа, 1990. – 416 с.
9. Чернега, Д. Ф. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: підручник / Д. Ф.Чернега, В. С.Богушевський, Ю. Я.Готвянський. – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.
10. Лыков, А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
11. Богушевський, В. С. Динамическая модель управления температурным режимом / Богушевський В. С., Сергеева Е. А., Жук С. В. // Металл и литье Украины – 2011. – № 5. – С. 24 – 28.
12. Богушевський, В.С. Динамічна модель контролю температурного режиму конвертерної ванни / Богушевський В. С., Жук С. В.// Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2011. – № 1. – С. 90 – 96.

Abstract

The metal temperature on the tapping from converter is an important parameter responsible for the success of the whole process. We have developed the model of temperature behavior control on the basis of theoretical explanation of kinetic processes of metal impurities oxidation and dissolution of cooling elements with heat-exchange process. These processes are regarded as a constituent part of the closed control system. While studying the thermic operation of fettling we found out that the temperature of the fettling fire surface (which contacts with the metal), reacts on the temperature change. These impacts provoke the low-frequency harmonious constituent of the temperature field with the cycle of vibration equal to the average melting duration. Our research has also shown that the impact of lime on the bath temperature depends on the insertion time. The later the lime is inserted the less one can see its cooling effect. The same dependence nature may be observed while studying the impact of the lime insertion time on the bath temperature. If the lime is inserted later, its chemical decomposition will be incomplete. The researches of experimental data in operating production conditions showed appropriateness of the approach usage

Keywords: model, converter, metal bath, temperature behavior

Аналізується рівень відповідності фізико-математичних моделей нано-електронних виробів, технологій їх проектування та виробництва. Пропонуються критерії класифікації швидкодіючої електронної апаратури з метою розробки системних засобів їх фізико-математичного моделювання

Ключові слова: моделювання, наноелектроніка, технології проектування

Анализируется уровень соответствия физико-математических моделей нано-электронных изделий, технологий их проектирования и производства. Предлагаются критерии классификации быстродействующей электронной аппаратуры с целью разработки системных способов их физико-математического моделирования

Ключевые слова: моделирование, нанoeлектроника, технологии проектирования

УДК 620.3

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В НАНОЕЛЕКТРОНІЦІ

В. Г. Кудря

Кандидат технічних наук, доцент*

Контактний тел.: 066-923-96-74

E-mail: vcudrya@mail.ru, admin@osar.odessa.ua

Ю. О. Лемехов

Аспірант*

Контактний тел.: 066-452-56-98

E-mail: yurakaban1986@gmail.com

Є. Л. Саркісьян

Аспірант*

Контактний тел.: 063-828-79-31

E-mail: acksummoner@ukr.net

*Кафедра інформаційних систем і мереж

Одеська національна академія харчових технологій

вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082

1. Введення

Рівень фізико-математичного обґрунтованості в різні часи та на різних етапах розвитку залежав як від

рівня технологій (від палиці до нанотехнологій), так і рівня математичного забезпечення. Як правило, піклуючись про матеріально-виробничу сферу розробники фізичних моделей віддалялись від математичних те-