

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.74.043.2

В.С. Богушевський, Я.К. Антоневич

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ВАННИ ПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

Based on the system approach of the phenomena of heat transfer in a furnace, we obtain relations of kinetics of transition change rate of bath temperature field from the load in the solid metal charge. We uncover the general form of the power expression of the wave process in the bath without integrating differential equations using the experimental data, the ratio of similarity theory, as well as physical modeling. In addition, we obtain criterion equations of heat transfer at fully developed turbulent flow for the internal problem. The heat transfer phenomena are described in the form of the transfer function of the first-order inertial link. The model of heat transfer bath - charge is represented by an object with lumped parameters and used to predict the temperature. The described mathematical model of heat treatment in the induction furnace bath provides high accuracy for obtaining the desired melt temperature. The model can be used in other thermal processes, in which the mixture consists of solid and liquid parts.

Вступ

Температура металу, що надходить в камеру пресування машини лиття під тиском (ЛПТ), є важливим параметром технологічного процесу. Вона впливає на всі технологічні операції: режим змащування прес-форми, тепловий, запресовку, підпресовку, час витримки готового відливка в прес-формі. Уважно стежити за температурним режимом плавки змушує і те, що навіть незначне підвищення температури (на 20–40 °С) порівняно з допустимою для цього матеріалу тигля різко зменшує термін служби останнього [1–4].

Вважаємо, що внаслідок інтенсивного перемішування рідкого металу електромагнітним полем температура розплаву в тиглі по всьому об'єму однакова. При цьому у ванні, як в робочому тілі ідеального змішувача, можна знехтувати перепадом масового вмісту компонентів і температури по об'єму та розглядати процеси для випадку фізично "тонкого" тіла.

Відома ціла низка різноманітних методів контролю температури печі [1]. Разові заміри температури в агрегаті термopарамі занурення є домінуючим методом контролю температури [2]. Але такі методи мають відносно високу вартість в умовах нагрівання металу в тигельних агрегатах. Крім того, постійне довантаження печі твердим холодним металом, по-перше, заважає проводити прямі виміри температури, і, по-друге, робить їх недостатньо інформативними, тому що частина металу перебуває у твердому стані [5].

Постановка задачі

Метою дослідження є створення моделі прогнозування температурного режиму ванни плавильної печі, що дасть змогу керувати нагріванням металу і не потребуватиме прямих вимірів температури.

Результати досліджень

Дослідження проводились на індукційній тигельній печі (ІТП) при переplавці алюмінієвих сплавів.

При відсутності безперервного інструментального контролю температури металу в печі для отримання якісних виливків виникає необхідність прогнозування температурного режиму об'єкта за математичною моделлю, яка враховує як тепловий стан ванни, так і втрати теплоти на нагрів футерівки.

За витратами енергії на теплову обробку алюмінієвого завантаження процес належить до енергоємних, що зумовлено високими значеннями теплоємності та теплоти плавлення робочого тіла. Найбільш енергоємним є етап розплавлення, на його частку припадає 50 % енергозатрат.

У ході плавки, що має циклічний характер, змінюються температура, склад і гідродинамічні параметри рідкої фази. Складність теоретичного аналізу теплообміну системи ванна–завантаження зумовлюється взаємозв'язком масо- і теплообміну на границі фазового перетворення.

У розробленні механізму плавлення твердого тіла та створенні схем розрахунку велику роль відіграють праці Е.М. Гольдфарба [6], М.А. Глінкова [7], Д.А. Гітгарца [8] та ін.

Процес плавлення твердого тіла у ванні розплаву можна розділити на три адитивних періоди, що йдуть один за одним. Перший – тепловий, характеризується прогріванням шихти при інтенсивному поглинанні теплоти розплаву. Другий – дифузійний, що враховує комплексний масо- і теплоперенос. При розігріванні рідкої фази до температури, що перевищує температуру плавлення твердого завантаження, починається третій період – інтенсивного плавлення і прогрівання, який характеризується тим, що складо-

ві частини завантаження добре прогріті і градієнт температури по їх перерізу близький до нуля.

Точні методи виявляються малоефективними для багатьох практичних задач, оскільки їх застосування пов'язане з громіздкими розрахунками, доволі складними для програмування. Числові методи також об'ємні та незручні для аналізу й інженерних розрахунків.

Процес теплової обробки металошихти у ванні ІТП, лімітуюча ланка якого – зовнішній теплообмін, протікає при початкових умовах, які враховують температуру скрапу та розплаву, їх масу, насипну щільність завантаження, яка за безпечує ефективну поверхню контакту з розплавом на границі розділу фаз, теплофізичні характеристики робочих тіл, питому потужність печі і т.д.

Для спрощення задачі теплофізичні властивості робочих тіл, що беруть участь у теплообміні, приймаємо постійними при середній інтегральній температурі по об'єму. Вважаємо, що внаслідок високої теплопровідності твердого алюмінію процес його плавлення у ванні, що барботується, практично проходить без ефекту намерзання, оскільки завантаження швидко прогрівається по об'єму за рахунок інтенсивної теплоти, що підводиться.

Так як нагрівання, плавлення і перегрівання твердого завантаження в ІТП відбувається за рахунок тепловіддачі від рідкого металу, необхідною умовою нормальної експлуатації агрегату є робота з неповним зливом, тобто із залишком рідкого металу (ЗРМ) в тиглі, що становить 60–70 % від садки. Процес теплової обробки завантаження відбувається з використанням ентальпії перегрівання ЗРМ і частково теплоти плавлення металу згідно з балансом:

$$\beta(\varphi)m[c(t_l - t_n) + \vartheta] = m_0[c_p(t_{к.р} - t_l) + \mu\vartheta], \quad (1)$$

де $\beta(\varphi)$ – масова частка твердої металошихти φ -го вигляду, що розплавляється в момент завантаження у ванну; m, m_0 – маса завантаження і ЗРМ, кг; c, c_p – середня питома теплоємність твердого і рідкого металів, Дж/(кг·К); $t_l, t_{к.р}$ – температура ліквідуса завантаження середнього хімічного складу та кінцева температура рідкого металу, °С; t_n – середня початкова температура шихти в момент її завантаження у ванну, °С; ϑ – питома теплота плавлення металу, Дж/кг; μ – масова частка ЗРМ, що віддає теплоту плавлення на обробку завантаження.

На практиці процес в ІТП можливий при неповній кристалізації ЗРМ $\mu < 0,25$ [6]. Величина

$$\mu = \frac{\beta(\varphi)m[c(t_l - t_n) + \vartheta] - m_0c_p(t_{к.р} - t_l)}{m_0\vartheta} \quad (2)$$

для найбільш несприятливого випадку завантаження (стружка) становить $\mu = 0,19$.

У ванні, що рухається поступально, перенесення речовини визначається силою інерції (збереженням імпульсу) або зміною кількості руху – рівнянням, яке в інтегральній формі для гідродинамічно “тонкого” (з постійною по модулю швидкістю середовища в його об'ємі) тіла має вигляд [9]

$$I = m_0w = P_n/g, \quad (3)$$

де I – імпульс маси, що рухається, кг·м/с; P_n – потужність, що витрачається на електродинамічне перемішування ванни, Вт; $g = 9,81$ – прискорення сили земного тяжіння, м/с².

Використовуючи дані з [6] і вважаючи, що 10 % корисної потужності витрачається на електродинамічне перемішування ванни, розрахункова швидкість циркуляції рідкого алюмінію в робочому просторі, наприклад, однотонової ІТП промислової частоти типу ІАТ-1/0,4 МЗ, що працює з неповним (40 %) зливом рідкого металу, становить 1,35 м/с. Результат розрахунку погоджується з даними (1 м/с), наведеними в праці [8].

При $Re = w\bar{D}/\nu_p = 1,35 \cdot 0,75 / (0,458 \cdot 10^{-6}) = 2,21 \cdot 10^6 > Re_{kp}$ встановлюється розвинений турбулентний режим течії. Тут Re – критерій Рейнольдса, що визначає гідродинамічний характер руху середовища; $\bar{D} = 0,75$ – середній внутрішній діаметр футерівки печі, м; $\nu_p = 0,458 \cdot 10^{-6}$ – кінематична в'язкість ванни, м²/с; $Re_{kp} = 10^4$ – критичне значення критерію Рейнольдса.

Процес теплообміну у ванні в своїй основі має гідродинамічну природу, так як барботування ванни зумовлює інтенсивний теплообмін рідкої фази з поверхнею твердого тіла, що омивається.

У процесі плавки в ІТП між ванною рідкого металу та твердими тілами (завантаження, футерівка тигля) відбувається теплообмін при граничних умовах третього роду на вогневій поверхні. Перенесення теплоти у тверде тіло в загальному вигляді можна описати рівнянням

$$\alpha(t_p - t|_{x=0}) = -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від ванни до твердого тіла, Вт/(м·К); t_p – поточна темпера-

тура рідкого металу, °C; $t|_{x=0}$ – температура теплосприймаючої поверхні твердого тіла, °C; λ – теплопровідність твердого тіла, Вт/(м·К); $\left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0}$ – градієнт температури на границі розділу фаз, К/м; x – перпендикулярна до поверхні просторова координата твердого тіла, початок якої збігається з границею розділу фаз, м.

На основі реальних даних після нескладних перетворень отримуємо

$$t_p - t|_{x=0} = \lim_{\frac{\lambda}{\alpha} \rightarrow 0} \left(-\frac{\lambda}{\alpha} \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} \right) = 0, \quad (5)$$

тобто температура сприймаючої поверхні твердого тіла по ходу плавки прагне до температури металу. Отже, гранична умова третього роду перетворюється в більш просту граничну умову першого роду.

Основний режимний параметр системи – вимушена швидкість зміщення частинок робочого тіла. Згідно з теорією турбулентності Л.Д. Ландау, руху суцільного середовища в автотомельній області сприяють монотонна та пульсуюча складові частини швидкості потоку [10], які відповідальні за вимушені коливання параметрів. Співвідношення цих компонентів швидкості зумовлює масштаб розвитку утворення хвиль у робочому тілі [11].

У режимі вимушених коливань ванна ІТП поводить себе як лінійний осцилятор (резонатор Гельмгольца), який генерує теоретично нескінченно великий спектр гармонік. Рухаючись вздовж лінії потоку, частинки ванни на фоні монотонної зміни швидкості викликають вимушені затухаючі коливання останньої з нескінченим спектром зростаючих частот і, відповідно, амплітуд, що зменшуються. Проте, як показує аналіз частотних властивостей об'єкта в припущеннях, прийнятих у технічній теорії коливань, металева ванна як важка та в'язка рідина, пропускаючи частоту основного струму через дисипативний ефект, є інтенсивним фільтром подальших частот головних гармонік параметра, що коливається, без практичного виявлення гармонічної реакції.

Найбільш представницький у метрологічному плані основний тон, якому відповідає коливання з найнижчою частотою першої головної гармоніки і який вміщує майже всю енергію пульсуючого руху. Амплітуду основного тону вимушених коливань визначаємо за її часткою (відносній амплітуді) від відповідного значення монотонної складової частини. Цю частку знаходимо за дани-

ми досліджень С.С. Кутателадзе і В.Є. Накорякова як функцію гідродинамічного режиму, що залежить від конвективного члена w – повздовжнього компонента швидкості потоку крапельної рідини у вертикальній трубі. Для випадку розвиненої турбулентності середня за перерізом труби відносна амплітуда (міра пульсацій) становить $\varepsilon = w_1/w = 0,8$, де w_1 – амплітуда першої головної гармоніки швидкості потоку, м/с.

Потужність хвильового процесу ванни визначається виразом [11]

$$P_{т.п} = 0,5 \xi_1^2 \omega_1^2 w_\Lambda F \rho_p, \quad (6)$$

де $P_{т.п}$ – потужність турбулентних пульсацій, Вт; $\xi = w_1/\omega_1$ – амплітуда осцилюючого зміщення частинок ванни, м; ω_1 – кругова частота коливань першої головної гармоніки швидкості ванни, рад/с; $w_\Lambda = \Lambda_1 \omega_1 / (2\pi)$ – швидкість поширення хвилі першої головної гармоніки швидкості ванни, м/с; $\Lambda_1 = 2\pi w_1 / \omega_1$ – довжина хвилі першої головної гармоніки швидкості ванни, м; $F = \pi \bar{D}^2 / 4$ – площа поверхні горизонтального перерізу агрегата як хвилеводу, м²; ρ_p – густина ванни, кг/м³.

Із врахуванням наведених співвідношень остаточно отримуємо

$$P_{т.п} = \pi w_1^3 \bar{D}^2 \rho_p / 8. \quad (7)$$

Використовуючи експериментальні дані та співвідношення теорії подібності, на основі фізичного моделювання знайшли загальний вигляд розв'язку без інтегрування диференціальних рівнянь. Отримано критеріальне рівняння теплопереносу при розвинутій турбулентності потоку для внутрішньої задачі в круговому циліндрі (формула Краусольда) [13] з гідродинамічною поправкою, яка викликана осциляцією рідини, що рухається:

$$St = 10^{-7} [Re(1 + \varepsilon)]^{0,8} Pr^{0,35}, \quad (8)$$

де $St = \lambda_p H / (c_p \rho_p w_p)$ – теплообмінний критерій Стентона; λ_p – теплопровідність рідкого металу, Вт/(м·К); $H = \alpha / \lambda_p$ – відносний коефіцієнт теплообміну у ванні, м⁻¹; $Pr = \nu_p / a_p$ – теплообмінний критерій Прандтля; $a_p = \lambda_p / (c_p \rho_p)$ – температуропровідність рідкого металу, м²/с.

Із (8) визначено числове значення коефіцієнта теплопереносу у ванні з врахуванням

теплофізичних даних $\lambda_p = 100 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $c_p = 1050 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ і $\rho_p = 2400 \text{ кг}/\text{м}^3$ [13]: $\alpha = 9050 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, що збігається із даними І.А. Партіна й ін., хто досліджував на вогняній моделі тепловіддачу від рідкого алюмінію до твердого тіла при різних режимах омивання [14].

Коливання ванни знижують опір переносу теплоти. Розрахунок показує, що додатний вклад у процес теплопереносу у ванні від гідродинамічного осцилюючого ефекту становить 6,2 %, що дає можливість збільшити на 1,6 % масову частку твердого завантаження, що переробляється.

Вважаємо, що внаслідок інтенсивного перемішування рідкого металу електромагнітним полем температура розплаву в тиглі по всьому об'єму однакова. При цьому у ванні, як у робочому тілі ідеального змішувача, можна знехтувати перепадом масового вмісту компонентів і температури по об'єму та розглядати процеси для випадку фізично "тонкого" (нульвимірного) об'єкта, що дає можливість виключити з його опису геометричні координати. Таким чином, маємо квазігомогенний, просторово ізотропний об'єкт із зосередженими параметрами.

Кінетика процесу обробки твердого завантаження в ІТП визначається його охолоджувальним впливом. На основі спрощувальних припущень зведено розв'язок на основі співвідношень термічно "тонкого" тіла без виділення границь фазового переходу, створено математичний опис процесу теплової обробки твердого завантаження у ванні ІТП, що барботується. Рівняння теплообміну між ванною та поверхнею шматків можна записати таким чином:

$$\lambda_p H F (t_{к.р} - t) = \frac{1}{60} m c_y \frac{dt}{d\tau}, \quad (9)$$

де F – площа поверхні шматків шихти, що омивається металом, м^2 ; m – маса частин шихти, які завантажуються у ванну; t – середня по товщині шматків поточна температура шихти, $^{\circ}\text{C}$; c_y – умовна середня питома теплоємність алюмінієвого сплаву, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, яка визначається із врахуванням твердої та рідкої фаз, а також теплоти плавлення:

$$c_y = c \frac{t_p - t_T}{t_p} + \frac{\vartheta}{t_p} + c_p, \quad (10)$$

де t_p – температура сплаву в рідкому стані; t_T – температура шихти у твердому стані.

Із врахуванням теплофізичних даних [13] після підстановки конкретних значень знаходимо

$c_y = 2240 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Перетворенням виразу (9) отримуємо звичайне диференціальне рівняння першого порядку з постійними коефіцієнтами

$$\frac{m c_y}{60 \lambda_p H F} \frac{dt}{d\tau} + t = t_{к.р}, \quad (11)$$

яке характеризує процес динаміки нагрівання, розплавлення та перегрівання завантаження з інерційним запізненням, хв:

$$\Delta\tau = m c_y / 60 \lambda_p H F, \quad (12)$$

що називається сталою часу перехідного процесу.

Вважаємо, що площа поверхні шматків завантаження обернено пропорційна його насипній щільності. Тоді згідно з рівнянням (12) можна записати

$$\Delta\tau(\varphi) = m c_y \rho(\varphi) / 60 \lambda_p H k, \quad (13)$$

де $\Delta\tau(\varphi)$ – стала часу перехідного процесу проплавлення завантаження φ -го вигляду, хв; $\rho(\varphi)$ – насипна щільність завантаження φ -го вигляду, $\text{кг}/\text{м}^3$; k – коефіцієнт пропорційності, $\text{кг}/\text{м}$.

Розв'язок рівняння (11) виражається асиметричною функцією

$$t = t_{к.р} \{1 - \exp[-\tau / \Delta\tau(\varphi)]\}. \quad (14)$$

Повний час інерції перехідного процесу рівняння (14), що описується інерційною ланкою першого порядку, або тривалість теплової обробки завантаження φ -го вигляду у ванні ІТП $\Delta\tau_{пл}(\varphi)$ визначається за відомим співвідношенням, хв:

$$\Delta\tau_{пл}(\varphi) \approx 3\Delta\tau(\varphi). \quad (15)$$

Теплота на нагрівання і розплавлення шихти споживається не миттєво, а із запізненням, що зумовлено такою ж інерційною ланкою, як у рівнянні (14). Отже, рівняння перехідного процесу для питомого теплового потоку q має такий вигляд:

$$q = q|_{\tau=0}(\varphi) \exp[-\tau / \Delta\tau(\varphi)], \quad (16)$$

де $q|_{\tau=0}(\varphi)$ – питома потужність, витрачена на процес теплової обробки завантаження φ -го вигляду в момент $\tau = 0$, $\text{Вт}/\text{кг}$. Для визначення значення $q|_{\tau=0}(\varphi)$ використовуємо співвідношення матеріально-теплового балансу при обробці завантаження φ -го вигляду у ванні печі:

$$Q[1 - \beta(\varphi)] = 60 q|_{\tau=0}(\varphi) \int_0^{3\Delta\tau(\varphi)} \exp[-\tau / \Delta\tau(\varphi)] d\tau, \quad (17)$$

де Q – питома теплота, витрачена на нагрівання, розплавлення та перегрівання завантаження, $\text{Дж}/\text{кг}$, визначається за формулою

$$Q = c(t_l - t_n) + \vartheta + c_p(t_{к.р} - t_l). \quad (18)$$

При охолодженні плавки завантаженням середнього хімічного складу $Q = 880 \cdot 10^3$ Дж/кг.

Нагрівання, розплавлення та перегрівання завантаження проходять у ванні практично одночасно. Середню тривалість кожної операції можна визначити як часткове від ділення розрахункового енергоспоживання (ентальпії) в відповідній операції на середнє значення існуючої потужності.

Ця модель при врахуванні ефектів термохімічних реакцій у формулах (10) і (18) може бути використана також для опису процесу засвоєння хімічної активності завантаження.

Функція $f(\varphi)$, °C, що визначається процесом теплової обробки завантаження φ -го вигляду у ванні, може бути записана так:

$$f(\varphi) = -\Delta t(\varphi) - \int_0^{3\Delta\tau(\varphi)} \frac{\partial t}{\partial \tau}(\varphi) dt, \quad (19)$$

де $\Delta t(\varphi)$ – зниження температури ванни внаслідок розплавлення металошихти φ -го вигляду в момент завантаження в піч, °C; $\frac{\partial t}{\partial \tau}(\varphi)$ – швидкість зміни

температури ванни, викликана проплавленням завантаження φ -го вигляду у ході плавки, °C/хв.

Використовуючи співвідношення матеріально-теплого балансу плавки, виразимо функцію $f(\varphi)$ у такому вигляді:

$$f(\varphi) = -\frac{\omega l}{Q} \times \left[Q\beta(\varphi) + 60q|_{\tau=0}(\varphi) \int_0^{3\Delta\tau(\varphi)} \exp\left(-\frac{\tau}{\Delta\tau(\varphi)}\right) d\tau \right], \quad (20)$$

де ω – питомий охолоджуючий ефект твердого завантаження, °C/%; l – відносна витрата завантаження, %.

Інтегруючи рівняння (20) із врахуванням початкових умов і теплового балансу плавки, отримуємо вираз кінетики перехідного процесу від температурного збурення ванни ІТП внаслідок теплової обробки металошихти

$$t = -t_p \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\Delta\tau(\varphi) [1 - \beta(\varphi)] m}\right) \right], \quad (21)$$

де $t_p = \frac{Q[1 - \beta(\varphi)] m}{0,95 c_p m_0}$ – значення температури про-

дуктів теплової обробки металошихти, що встановилося, °C; 0,95 – значення визначеного інтеграла

$$\frac{1}{\Delta\tau(\varphi)} \int_0^{3\Delta\tau(\varphi)} \exp\left(-\frac{\tau}{\Delta\tau(\varphi)}\right) d\tau; \quad \Delta\tau_y(\varphi) = \frac{c_y \rho(\varphi)}{60 \lambda_p H k}$$

– питоме значення сталої часу перехідного процесу, хв/кг.

Результати розрахунку індукційної плавки металу (рис. 1 і 2) отримано при $l = 40\%$; $t_n = 250$ °C; $t_l = 658$ °C; $t_{к.р} = 750$ °C і $k = 93$ кг/м, а також при параметрах, що залежать від виду завантаження (таблиця).

Як видно з рис. 2, при одному й тому ж самому завантаженні середня швидкість теплової обробки алюмінію зменшується зі збільшенням його насипної щільності приблизно в два рази при послідовному переході з одного виду заван-

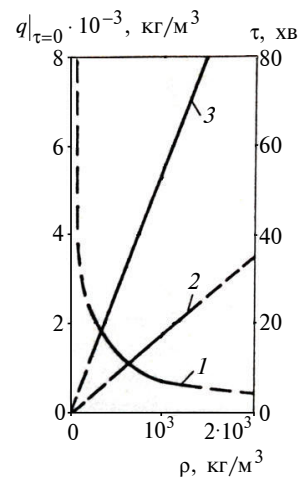


Рис. 1. Розрахункові залежності, що характеризують динаміку теплової обробки в ІТП алюмінію різної насипної щільності: 1 – питома потужність на початку плавки $q|_{\tau=0}$; 2 – стала часу перехідного процесу; 3 – тривалість теплової обробки завантаження; штрихові лінії – області нереальних значень насипної щільності

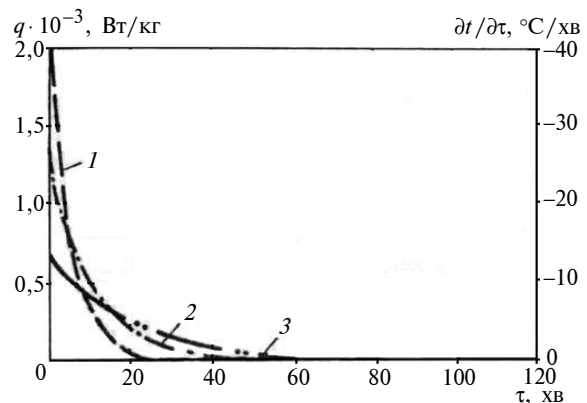


Рис. 2. Розрахункові залежності питомого потоку q і швидкості приросту температури ванни $\frac{\partial t}{\partial \tau}$ у ході плавки в ІТП, викликані тепловою обробкою алюмінієвого завантаження: 1 – легкого; 2 – середнього; 3 – вагового

Таблиця. Значення параметрів плавки, що залежать від виду завантаження

Вид завантаження ϕ	$\rho(\phi)$, кг/м ³	$\beta(\phi)$	$\Delta\tau_y(\phi)$, хв/кг	$\Delta\tau(\phi)$, хв	$\Delta\tau_{пл}(\phi)$, хв
Легка (стружка)	300	0,33	0,0133	5,32	16,0
Середня (ливники)	600	0,20	0,0266	10,65	32,0
Вагова (чушки)	1300	0,10	0,0576	23,05	69,2

таження на інший (20, 10 і 5 °С/хв). При верхньому обмеженні питомої корисної потужності ІТП до 200 Вт/кг в початковий період (20–25 % тривалості плавки) завантаження обробляється в основному теплотою, що акумульована ЗРМ.

Дані авторів узгоджуються з результатами розв'язку нелінійної задачі теплової обробки завантаження, представленої у формі гіпотетичних куль [7].

На основі створеного математичного опису теплової обробки завантаження в ІТП розроблено алгоритм прогнозування температури металу в рамках АСКТП плавки, який показав високу збіжність із експериментальними даними і забезпечив точність отримання розплаву заданої температури не нижче 1 %. Стандартне

відхилення температури металу зменшилось на 4,7 °С, що дало можливість значно покращити якість керування і ТЕП процесу.

Висновки

Описана математична модель теплової обробки металозавантаження у ванні ІТП забезпечує високу точність отримання розплаву заданої температури та її контроль в процесі додавання твердої кускової шихти. Ця модель при врахуванні ефектів термохімічних реакцій може бути використана також для опису процесу засвоєння хімічної активності завантаження. Модель може бути використана в інших теплових технологічних процесах, в яких шихта складається із твердої і рідкої частин.

У подальшому на основі моделі буде розроблено алгоритм керування температурою ІТП і проведено включення останнього в систему керування машиною ЛПТ.

Наведені в статті дослідження проведено в Національному технічному університеті України “КПІ” на тему “Математична модель і система управління машинами лиття під тиском”, Державний реєстраційний номер 0112U002173.

1. Беккер М.Б., Заславский М.Л., Игнатенко Ю.Ф. и др. Литье под давлением. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
2. Богушевський В.С., Сергеева К.О. Контроль температурного режиму конвертерної плавки // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2009. – № 6. – С. 75–80.
3. Вейник А.И. Термодинамика литейной формы. – М.: Машиностроение, 1968. – 336 с.
4. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 492 с.
5. Сергеева К.О. Вимірювання температури сталі у конвертері // Металознавство та обробка металів. – 2010. – № 1. – С. 36–39.
6. Гольдфарб Э.М. Теплотехника металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1967. – 440 с.
7. Глинков М.А. Тепловая работа сталеплавильной ванны. – М.: Металлургия, 1970. – 408 с.
8. Гидгарц Д.А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микро-ЭВМ. – М.: Энергоиздат, 1984. – 136 с.
9. Брокмайер К. Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1972. – 304 с.
10. Богушевский В.С., Сорокин Н.А., Лигоцкий И.Л. Теплообмен холодной металлозагрузки с расплавом в ванне печи // Изв. АН СССР. Металлы. – 1989. – № 3. – С. 15–20.
11. Тир Л.Л. О моделировании движения жидкого металла в индукционной плавильной печи // Магнитная гидродинамика. – 1965. – № 4. – С. 120–124.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Механика сплошных сред. – М.: Гос. изд-во техн. теорет. лит., 1953. – 784 с.
13. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Теплообмен и волны в газожидкостных системах. – Новосибирск: Наука, 1984. – 302 с.
14. Смитлз К.Дж. Металлы: Справ. / Пер. с англ.; под ред. С.Г. Глазунова. – М.: Металлургия, 1980. – 448 с.
15. Партин И.А., Смирнов А.А., Туранин С.Г. Исследование теплообмена в ванне плавильной печи на огневой модели // Цветные металлы. – 1984. – № 11. – С. 76–78.