

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООБМІНУ ОБРОБКИ МЕТАЛУ В НАГРІВАЛЬНИХ ПЕЧАХ

**Кропівний В.М., к.т.н., професор, Босий М.В., ст. викл.,
Кузик О.В., к.т.н., доцент, Кропивна А.В., к.т.н., доцент,
Центральноукраїнський національний технічний університет**

***Анотація.** Складні теплофізичні процеси, що протікають при тепловій обробці виливків у печах потребують більш точні моделі опису процесу нагрівання виливків в нагрівальних печах. У відомих моделях оцінки теплового стану металу (модель нагрівання) та тривалості нагрівання, а також модель управління тепловим режимом печі недостатньо приділено уваги вивченню тепломасообмінних процесів. В статті представлена математична модель процесу теплообміну при нагріванні металу в печі, яка описує теплофізичні процеси, що мають місце при використанні промислової технології нагрівання виливків. Показано, що модель нагрівання металу в печі може бути використана для вирішення задач підвищення ефективності роботи комплексу обладнання печі, а також для визначення потенціалу використання теплоти відхідних газів нагрівальних печей.*

***Ключові слова:** закон Ньютона-Ріхмана, нагрівання металу, метод відокремлення змінних, закон Стефана-Больцмана, нагрівальна піч*

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE HEAT EXCHANGE PROCESS OF METAL PROCESSING IN HEATING FURNACES

**Volodymyr Kropivnyi, Prof., PhD in tech. sci., Mykola Bosyi, Sen. Lect.,
Olexandr Kuzyk, Assoc. Prof., PhD in tech. sci.,
Alena Kropivna, Assoc. Prof., PhD in tech. sci.,
Central Ukrainian National Technical University**

***Abstract.** The article presents a mathematical model of the heat exchange process when heating metal in a furnace, which describes the thermophysical processes that occur when using industrial technology for heating castings. The model of heating the metal in the furnace taking into account the constant temperature of the furnace can be used to solve problems of increasing the efficiency of the furnace equipment, as well as to determine the heat potential of the exhaust gases of heating furnaces.*

***Key words:** Newton-Richmann law, metal heating, variable separation method, Stefan-Boltzmann law, heating furnace*

Вступ

Метали і сплави мають широке коло застосування в різних галузях промисловості, а розширене виробництво виливків і заготовок з металевих матеріалів з термічною обробкою дозволяє підвищити якість кінцевого продукту. Математичні моделі технологічних процесів нагрівання металу відіграють важливу роль у виробництві виливків і виробів, про що свідчать роботи [1, 2, 4, 5]. В ливарному виробництві для нагрівання металу широкого застосування набули нагрівальні печі [3,4].

Складні теплофізичні процеси, що протікають при тепловій обробці виливків у печах потребують більш точні моделі опису процесу нагрівання виливків в нагрівальних печах. У відомих моделях оцінки теплового стану металу (модель нагрівання) та тривалості нагрівання, а також модель управління тепловим режимом печі недостатньо приділено уваги вивченню тепломасообмінних процесів [3, 4, 11]. Для вивчення і аналізу цих питань в даній роботі проведено математичне моделювання тепломасообмінних процесів при нагріванні металу в печі.

Аналіз публікацій

Переважно моделювання ливарних об'єктів здійснюється на основі рівнянь математичної фізики. Особливості моделювання технологічних процесів лиття включають в себе специфічні процеси нагрівання металу в печі [1, 2, 4]. Найбільш зручним для цього є метод, який базується на фізичних законах теплопередачі: конвекція – на законі Ньютона-Ріхмана; випромінювання – на законі Стефана-Больцмана; теплопровідності – на законі Фур'є [5]. При побудові моделі на основі фізичних законів процедура полягає в побудові і виборі структури математичної моделі і мета моделювання та оцінці параметрів моделі за наявними даними про процеси які спостерігаються.

У більшості випадків в моделях теплообміну для визначення температури виливків використовуються тільки зональні термометри. Вплив всіх інших параметрів теплообміну можна привести до температури робочого простору в зоні печі. При цьому, модель теплообміну може бути представлена в променистій, променисто-конвективній, або тільки в конвективній формах. В межах фізичної зони печі вибирається кілька розрахункових зон. Для врахування нерівномірності температури робочого простору по довжині зони застосовуються різні способи «виправлення» показань зональних термометрів в залежності від координат по довжині зони. Уточнення істинного значення коефіцієнта сумарної теплопередачі, використовуваного в моделі нагрівання виливків, проводиться шляхом порівняння вимірних значень температури поверхні металу в зонах з відповідними розрахованими значеннями [5].

В роботі [6] розроблена спрощена модель динаміки нагрівання металу у системі «пічні газы – кладка печі – метал» без суттєвого відхилення від динаміки реального об'єкту. Запропоновано математичну модель оптимального управління процесом малоокислювального нагрівання металу за умов печей камерного типу. В якості критеріїв дій, що управляють, розглянуто витрату палива, питому витрату кисню та коефіцієнт витрати повітря, яке подають на допалювання палива [7].

В роботі [8] на основі апроксимації миттєвого розподілу температури по товщині металу, що нагрівається, запропонована математична модель нагріву на основі експоненціальної функції. Вона може бути запропонована при синтезі оптимального по швидкості алгоритму управління температурним режимом нагрівальної печі камерного типу.

Аналіз відомих методів оптимізації процесу нагрівання масивних зливків під час термічної обробки в полумєневих термічних печах камерного типу свідчить про математичну модель [9], яка дозволяє без розв'язання диференціальних рівнянь теплопровідності розробити алгоритм розрахунку температури нагрівального середовища за часом, що забезпечує заданий розподіл температури щодо перерізу зливків за термічної обробки з двома та більше рівнями сталості. Показано, що математична модель та розроблений алгоритм розрахунків нагрівання термічно масивних тіл у полумєневих печах камерного типу, можливо використовувати під час розгляду управління процесом нагрівання металу під термічну обробку з трьома та більше рівнями сталості [10].

Розглянуті відомі задачі математичної оптимізації нагрівання металу під термічну обробку в полумєневих печах камерного типу [11]. Встановлено, що вирішення задач вказаного типу є ускладненим через відсутність простої моделі, яка б визначала залежність кінцевих показників якості нагрівання від дій, що управляють у системі «гріночі газу – кладка – метал». При прийнятті деяких припущень результати моделювання можливо використовувати тільки для якісного аналізу теплової роботи печей.

Оскільки, адекватність моделей в реальному процесі визначається методами ідентифікації, то у цьому випадку інформація про температуру металу є джерелом оцінки якості моделі і розробки простих і надійних алгоритмів ідентифікації. Для прогнозу часу нагрівання виливків, заготовок використовується оцінка математичної моделі інтервалу часу між послідовною подачею в піч двох виливків однієї партії металу. Таким чином, побудова уточненої математичної моделі, яка враховує усі процеси теплообміну при нагріванні металу в нагрівальних печах є безумовно актуальним завданням.

Результати досліджень та їх обговорення

Виявлено, що математичні моделі будуються здебільшого для однофакторних систем (тобто для систем з однією незалежною змінною) і не часто – для систем з більшою кількістю незалежних змінних. Розглянемо математичну модель нагрівання металу в печі для умов, що тіло, яке нагрівається є «тонким», тобто в нього, коефіцієнт теплопровідності λ є дуже великим, і тепла енергія від печі до металу передається у відповідності до закону Ньютона-Ріхмана при сталій температурі печі ($T_{\text{п}} = \text{const}$).

В момент часу τ від початку нагрівання за проміжок часу $d\tau$ від печі до металу, за наведеною схемою (рис. 1) передається кількість теплоти, що дорівнює:

$$\delta Q = \alpha(T_{\text{п}} - T_{\text{м}})F d\tau, \quad (1)$$

де α – ефективний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від пічних газів до металу, Вт/м²·К; $T_{\text{п}}$ і $T_{\text{м}}$ – температури печі і металу, К; F – теплосприймаюча поверхня металу, м².

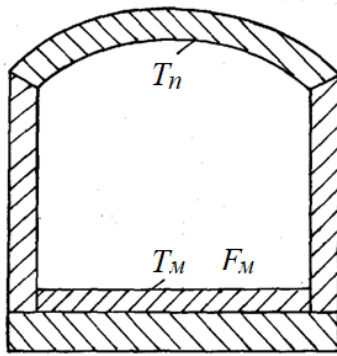


Рисунок 1 – Схема нагрівання металу в печі

Кількість теплоти δQ , яка нагріває метал на температуру dT_M , К становить:

$$\delta Q = mcdT_M, \quad (2)$$

де m і c – маса і теплоємність металу.

Прирівнюємо праві частини рівнянь (1) і (2) та одержуємо диференціальне рівняння процесу, яке пов'язує між собою дві змінні величини – час нагрівання τ і температуру металу T_M :

$$\alpha(T_{\Pi} - T_M)F d\tau = mcdT_M. \quad (3)$$

Рівняння (3) розв'язуємо методом відокремлення змінних:

$$\int_0^{\tau} d\tau = (mc/\alpha F) \int_{T_{M, \text{поч}}}^{T_{M, \text{кін}}} dT_M / (T_{\Pi} - T_M). \quad (4)$$

Проінтегруємо рівняння (4) і одержуємо вираз для визначення тривалості нагрівання:

$$\tau = (mc/\alpha F) \ln \left[(T_{\Pi} - T_{M, \text{поч}}) / (T_{\Pi} - T_{M, \text{кін}}) \right]. \quad (5)$$

Вираз (5) і буде теоретичною моделлю нагрівання металу в печі.

Масу металу представимо, як добуток його густини на об'єм ($m = \rho V$), а відношення об'єму до площі поверхні F – як приведену товщину тіла $S_{\text{пр}} = V/F$. Враховуючи це рівняння (5) приймає вигляд:

$$\tau = (\rho S_{\text{пр}} c / \alpha) \ln \left[(T_{\Pi} - T_{M, \text{поч}}) / (T_{\Pi} - T_{M, \text{кін}}) \right]. \quad (1.6)$$

Величина ефективного коефіцієнта тепловіддачі конвекцією α відома і може визначатися за літературними даними або за формулою [2]

$$\alpha = C_{\text{пр}} 10^{-8} (T_{\Pi} + T_M) (T_{\Pi}^2 + T_M^2), \quad (7)$$

де $C_{\text{пр}}$ – приведений коефіцієнт випромінювання в системі «кладка-метал», розраховується за формулою [2]

$$C_{\text{пр}} = 1 / \left[(1/C_{\text{п}} - 1/C_{\text{о}}) \phi_{\text{пм}} + 1/C_{\text{о}} + (1/C_{\text{м}} - 1/C_{\text{о}}) \phi_{\text{мп}} \right], \quad (8)$$

де $C_{\text{п}}$, $C_{\text{м}}$ і $C_{\text{о}}$ – коефіцієнти випромінювання внутрішньої поверхні кладки робочого простору печі, поверхні металу і абсолютно чорного тіла; $\phi_{\text{пм}}$ і $\phi_{\text{мп}}$ – відповідні кутові коефіцієнти.

Якщо нагрівання металу в печі здійснюється у відповідності до закону Стефана-Больцмана, то елементарна кількість теплоти процесу дорівнює:

$$\delta Q = C_{\text{пр}} \left[(T_{\text{п}}/100)^4 - (T_{\text{м}}/100)^4 \right] F_{\text{м}} d\tau. \quad (9)$$

Прирівняємо праві частини рівнянь (9) і (2), після інтегрування методом відокремлених змінних, одержуємо:

$$\int_0^{\tau} d\tau = \left(mc / C_{\text{пр}} F_{\text{м}} \right) \int_{T_{\text{м,поч}}}^{T_{\text{м,кін}}} dT_{\text{м}} / \left[(T_{\text{п}}/100)^4 - (T_{\text{м}}/100)^4 \right]. \quad (10)$$

Після відповідного інтегрування рівняння (10) математична модель (5) тривалості нагрівання металу в печі набуває вигляду:

$$\tau = \left(\rho S_{\text{пр}} c 10^8 / C_{\text{пр}} T_{\text{п}}^3 \right) \left\{ 0,5 \left[\arctg(T_{\text{м,кін}}/T_{\text{п}}) - \arctg(T_{\text{м,поч}}/T_{\text{п}}) \right] + 0,25 \ln \left[\frac{(1 + T_{\text{м,кін}}/T_{\text{п}})(1 - T_{\text{м,поч}}/T_{\text{п}})}{(1 - T_{\text{м,кін}}/T_{\text{п}})(1 + T_{\text{м,поч}}/T_{\text{п}})} \right] \right\}. \quad (11)$$

Враховуючи зазначені припущення, моделі (5) і (11) можна віднести до моделей, що описують нагрівання «тонких» тіл.

Якщо тіло «масивне», то математична модель, крім рівнянь (5) або (11), враховує співвідношення, наведені в роботі [2]:

$$\tau_{\text{ф}} = m\tau; \quad (12)$$

$$m = 1 + 0,5\text{Bi}, \quad (13)$$

де $\tau_{\text{ф}}$ – дійсний час нагрівання «масивного» тіла; τ – час, що визначається за формулами (5) або (11); $\text{Bi} = \alpha S_{\text{пр}} / \lambda$ – число Біо;

За отриманою математичною моделлю проведено оцінювання часу нагрівання вилівка в нагрівальному колодязі печі: розмір вилівка 0,3х0,3х0,6 м; розмір вертикально розміщеного колодязя печі, який нагрівається 0,6х0,6х1м при сталій температурі печі $T_{\text{п}} = 1873\text{K}$ (1600 °С), кінцевій температурі металу $T_{\text{м,кін}} = 1453\text{K}$ (1180 °С), початковій температурі металу $T_{\text{м,поч}} = 291\text{K}$ (18 °С), густині металу $\rho = 7200\text{ кг/м}^3$, теплоємності металу $c = 0,7\text{ кДж/кгК}$, коефіцієнтах випромінювання металу і кладки, відповідно, $C_1 = 4,0$ і $C_2 = 4,7\text{ Вт/м}^2\text{К}^4$, коефіцієнті теплопровідності металу $\lambda = 20\text{ Вт/мК}$. Час нагрівання вилівка за формулою (11) становить $\tau = 0,28$ год., ефективний коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 714\text{ Вт/м}^2\text{К}$, число $\text{Bi} = 2,35$, параметр $m = 2,17$. Фактичний час нагрівання дорівнює $\tau = 0,62$ год. Одержанні в наведеному прикладі розрахун-

кові значення часу нагрівання металу $\tau_e=0,61$ год. близькі до дійсних $\tau \approx \tau_e$, тобто модель можна вважати адекватною.

Висновки

Побудована модель конвективного і променевого нагрівання металу в печі на звичайних диференціальних рівняннях, яка дозволяє розраховувати час нагрівання виливків з різних сплавів. Показано, що модель нагрівання металу в печі з урахуванням сталої температури печі може бути використана для вирішення задач підвищення ефективності роботи комплексу обладнання печі, а також для визначення потенціалу використання теплоти відхідних газів нагрівальних печей.

Література

1. Сабірзянов Т.Г. Математичне моделювання технологічних процесів лиття. Кіровоград: КНТУ, 2007. 74 с.
2. Сабірзянов Т.Г. Кропівний В.М. Теплотехніка ливарних процесів. Кіровоград: КНТУ, 2005. 402 с.
3. Сабірзянов Т.Г. Печі ливарних цехів. Кіровоград: КНТУ, 2007. 280 с.
4. Кривандин В.А., Марков Б.Л. Металлургические печи. М: Металлургия, 1977. 464 с.
5. Ткаченко В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. Киев, Наукова думка. т.13. 2008. 243 с.
6. Ревун М.П., Зінченко В.Ю., Іванов В.І., Мосейко Ю.В. Модель динаміки нагрівання металу в полумєневих печах камерного типу. Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя. Математичне моделювання. № 1 (34), 2016. С. 32-34.
7. Каюков Ю. М., Іванов В. І., Чепрасов О. І., Радченко Ю. М. До управління малоокислювальним нагріванням металу в печах камерного типу. Металургія. Випуск 2 (40), 2018. С.106-110.
8. Ревун М.П., Іванов В.І., Мосейко Ю.В. Модель нагрівання металу в печах камерного типу. Научные труды SWORLD ООО Научный мир (Иваново) т.2 №2(43) 2016. С. 85-92.
9. Зінченко В.Ю., Іванов В.І., Чепрасов О.І., Каюков Ю.М., Запорізька державна інженерна академія. Запоріжжя. До оптимізації управління тепловою роботою полумєневих термічних печей камерного типу під час нагрівання масивних зливків. Математичне моделювання № 1(38). 2018. С. 88-94.
10. Ревун М.П., Зінченко В.Ю., Іванов В.І., Чепрасов О.І. Розробка математичної моделі й алгоритму розрахунків нагрівання термічно масивних тіл у полумєневих термічних печах камерного типу Металургія. Випуск 1 (35), 2016. С. 72-77.
11. Ревун М.П., Зінченко В.Ю., Іванов В.І., Чепрасов О.І. Розробка математичної моделі й алгоритму розрахунків нагрівання під термічну обробку злитків у полумєневих камерних печах. Металургія. Випуск 2 (34), 2016. С. 93-97.