

М.П. РЕВУН, доктор техн. наук, професор
В.Ю. ЗІНЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент
В.І. ІВАНОВ, ст. наук. співробітник
Ю.В. МОСЕЙКО, канд. пед. наук, доцент
 Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя

Модель динаміки нагрівання металу в полумєневих печах камерного типу

Виконано спрощення моделі динаміки нагрівання металу в системі «підні газів – кладка печі – метал» для полумєневих печей камерного типу. Розроблено структурну схему динаміки нагрівання металу в печах за-гаданого типу та визначено передатні функції системи за всіма каналами впливу. Для вирішення задачі оптимізації встановлена можливість спрощення зазначеної моделі виключенням малих значень постійних часу нагрівання пічних газів і кладки печі.

Постановка проблеми

У разі загальної постановки задача управління тепловою роботою полумєневих печей камерного типу передбачає розробку та реалізацію оптимального алгоритму змінювання за часом теплового впливу на метал, що нагрівають. Пошук оптимальних алгоритмів управління здійснюють на основі побудованих априорі математичних моделей динаміки у системі «підні газів – кладка печі – метал».

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Серед перших робіт з оптимізації управління тепловою роботою печей зазначеного типу вирішено задачу нагрівання термічно тонких тіл з мінімальною витратою палива [1-2]. Було показано, що мінімум витрати палива забезпечують під час нагрівання з наростаючою тепловою потужністю, яке виявляється тривалим за часом, проте для кожного конкретного випадку існує певний час нагрівання. Аналогічні результати для нагрівання термічно масивних тіл одержано у роботі [3]. Оптимізацію виконували із застосуванням спрощеної моделі нагрівання термічно тонкого тіла, коли температурний стан оцінюють за температурою, яка є усередненою щодо маси металу, та використовували умовний коефіцієнт теплопередачі.

В публікаціях [4,5] визначено оптимальні режими теплової роботи печей за економічними критеріями, у статті [6] розглянуто управління їх тепловою роботою з позиції забезпечення заданої точності нагрівання металу.

Для вирішення прикладних задач оптимізації запропоновано спрощений алгоритм розрахунків зв'язаного теплообміну в нагрівальних печах камерного типу з урахуванням неізотермічності об'єму, що нагрівають [7], і використанням методу дискретного вдоволення крайових умов, згідно з яким необхідно вирішувати систему нелінійних диференціальних рівнянь.

Зважаючи на складність математичного описування теплообміну в даній системі алгоритм управління нерідко визначають виходячи тільки з динаміки нагрівання власне металу без урахування інерційності пічних газів і кладки печі, що призводить до некоректної постановки задачі оптимізації та знижує практичну цінність отриманих результатів.

Формулювання мети дослідження

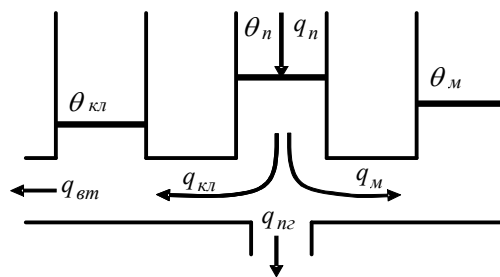
Завданням роботи є розробка спрощеної моделі динаміки нагрівання у системі «підні газів – кладка печі – метал» без суттєвого відхилення від динаміки реального об'єкту.

Виклад основного матеріалу

Система «підні газів – кладка печі – метал» з по-

зиції управління є нелінійним об'єктом з розподіленими у часі та просторі параметрами, якого описують диференціальним рівнянням з частинними похідними [8].

Враховуючи, що на практиці управління здійснюють змінюванням теплового навантаження за результатами вимірювання температури в одній (рідше декількох) зонах робочого об'єму та, залишаючи осторонь просторові координати печі та металу, який нагрівають, динаміку нагрівання можна визначити процесами обміну й акумуляції теплоти між тепловими ємностями згідно розрахункової схеми, поданої на рис. 1.



$q_n, q_{кл}, q_m, q_{пг}, q_{вт}$ — теплові потоки на вході у робочий об'єм печі, до її кладки, металу, що нагрівають, втрати з продуктами горіння та через кладку до довкільля відповідно; $\theta_n, \theta_{кл}, \theta_m$ — рівень теплової енергії, що акумульовано у ємностях, які визначають відповідно середньо інтегральними температурами пічних газів, кладки печі та металу.

Рис. 1. Розрахункова схема системи «підні газів – кладка печі – метал»

Складаючи тепловий баланс для кожної ємності моделі, можна записати систему рівнянь:

$$m_n \cdot c_n \frac{d\theta_n}{d\tau} = q_n - q_{кл} - q_m - q_{пг} - q_{вт}, \quad (1)$$

$$m_m \cdot c_m \frac{d\theta_m}{d\tau} = q_m; \quad (2)$$

$$m_{кл} \cdot c_{кл} \frac{d\theta_{кл}}{d\tau} = q_{кл}, \quad (3)$$

де $m_n, m_m, m_{кл}$ — маса пічних газів у робочому об'ємі, металу та кладки печі, кг, відповідно; $c_n, c_m, c_{кл}$ — питома теплоємність пічних газів, металу та кладки печі, кДж/(кг·К), відповідно.

Приймаючи, що, за малих відхилень від стану

початкової рівноваги, теплові потоки q_m і $q_{кл}$ є пропорційними перепадам температури, теплові втрати з продуктами горіння залежать тільки від температури пічних газів θ_n , а теплові втрати через кладку печі – від рівня її температури $\theta_{кл}$, можна подати систему рівнянь (1)-(3) як

$$m_n \cdot c_n \frac{d\theta_n}{d\tau} = q_n - \alpha_{кл\Sigma} \cdot F_{кл} \cdot (\theta_n - \theta_{кл}) - \alpha_{м\Sigma} \cdot F_m \cdot (\theta_n - \theta_m) - \alpha_{м\Sigma} \cdot F_m \cdot (\theta_n - \theta_m) - V_{n2} \cdot c_{cn} \cdot \theta_{n2} - \alpha_{\theta m} \cdot F_{кл} \cdot \theta_{кл}; \quad (4)$$

$$m_m \cdot c_m \frac{d\theta_m}{d\tau} = \alpha_{м\Sigma} \cdot F_m \cdot (\theta_n - \theta_m); \quad (5)$$

$$m_{кл} \cdot c_{кл} \frac{d\theta_{кл}}{d\tau} = \alpha_{кл\Sigma} \cdot F_{кл} \cdot (\theta_n - \theta_{кл}), \quad (6)$$

де $\alpha_{кл\Sigma}$, $\alpha_{м\Sigma}$, $\alpha_{\theta m\Sigma}$ — сумарний коефіцієнт теплопередачі (конвекцією та випромінюванням) між пічними газами та кладкою, пічними газами і металом, а також кладкою печі та доквіллям, Вт/(м²·К), відповідно; $F_{кл}$, F_m — площа поверхні кладки та металу, які беруть участь у теплообміні, м², відповідно; V_{n2} — об'ємна витрата продуктів горіння, м³/год.; c_{n2} — питома об'ємна теплоємність продуктів горіння, кДж/(м³·К).

Вводять позначення

$$T_n = \frac{m_n \cdot c_n}{\alpha_{м\Sigma} \cdot F_m + \alpha_{кл\Sigma} \cdot F_{кл} + V_{n2} \cdot c_{n2} + \alpha_{\theta m\Sigma} \cdot F_{кл}}; \quad (7)$$

$$T_m = \frac{m_m \cdot c_m}{\alpha_{м\Sigma} \cdot F_m}; \quad (8)$$

$$T_{км} = \frac{m_{кл} \cdot c_{кл}}{\alpha_{кл\Sigma} \cdot F_{кл}}; \quad (9)$$

$$K_m = \frac{1}{\alpha_{кл\Sigma} \cdot F_{кл} + \alpha_{м\Sigma} \cdot F_m + V_{n2} \cdot c_{n2}}; \quad (10)$$

$$K_{кл} = \alpha_{кл\Sigma} \cdot F_{кл}; \quad (11)$$

$$K_m = \alpha_{м\Sigma} \cdot F_m; \quad (12)$$

і здійснюють вирішення системи рівнянь (4)-(6), а також перехід до зображення Лапласа, отримують структурну схему динаміки нагрівання металу в печі, що подана на рис. 2.

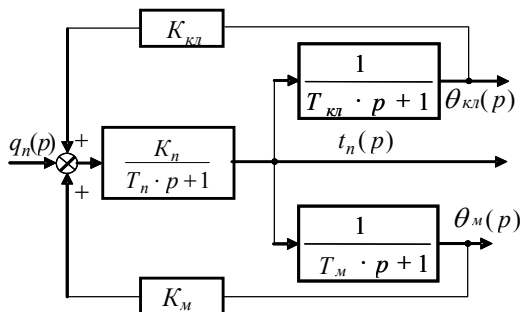


Рис. 2. Структурна схема динаміки нагрівання металу в печі

Така структурна схема дозволяє визначити передатну функцію системи за всіма каналами впливу:

$$q_n(p) \Rightarrow \theta_n(p); \quad q_n(p) \Rightarrow \theta_m(p); \quad q_n(0) \Rightarrow \theta_{кл}(p).$$

Так, за каналом управління передатна функція системи має вигляд:

$$W(p) = \frac{\theta_m(p)}{q_n(p)} = \frac{b_0 + b_1 \cdot p}{a_0 + a_1 \cdot p + a_2 \cdot p^2 + a_3 \cdot p^3}, \quad (13)$$

де p — оператор Лапласа; $a_0 = 1 - (K_m + K_{кл})$; $a_1 = T_n \cdot (1 - T_{кл} - T_m) + T_m \cdot (1 - T_{кл}) + T_{кл} \cdot (1 - K_m)$; $a_2 = T_n \cdot T_m + T_{кл} \cdot T_m \cdot (1 - K_m)$; $a_3 = T_{кл} \cdot T_m \cdot T_{n2}$; $b_0 = K_n$; $b_1 = K_n \cdot T_{кл}$.

Аналогічний вигляд мають передатні функції за іншими каналами.

З наведеної структури виходить, що усередині системи є зворотні позитивні зв'язки з коефіцієнтами передачі $K_{кл}$ і K_m , які підвищують чутливість температури пічних газів і температури металу до змінювання теплової потужності q_n та в той же час, за $K_m + K_{кл} < 1$, збільшують інерційність каналів управління. Під час змінювання значень сумарних коефіцієнтів теплопередачі $\alpha_{кл\Sigma}$, $\alpha_{м\Sigma}$ інерційність усієї системи також змінюється. Значення постійних часу нагрівання T_n , T_m і $T_{кл}$ визначаються розмірами, масою і теплофізичними параметрами садки металу та є змінними у процесі нагрівання. Тому реалізація прецизійних режимів нагрівання є можливою тільки за адаптації пристроїв управління безпосередньо під час нагрівання.

Для передатної функції, що отримано за каналом управління $q_n(p) \Rightarrow \theta_m(p)$, характерним є неоднорідне диференціальне рівняння третього порядку з похідними у його правій частині. Таке рівняння не дозволяє використовувати відомі математичні методи оптимізації [9], оскільки вища та перша похідні від впливу, що управляє, мають зазнавати розриви. Досвід розв'язання таких задач свідчить, що аналітичне вирішення можна отримати тільки під час спрощення як математичної моделі, так і самої задачі оптимізації. Зниження порядку диференціального рівняння можливе виключенням малих значень постійних часу нагрівання.

Для оцінки порядку значень зазначених параметрів (T_m , T_n і $T_{кл}$) виконували обчислення теплового та температурного режимів полумєневої рециркуляційної печі для термічної обробки масивних заготовок загальною масою 20 т за наступних початкових даних: поверхня кладки печі – 114 м², поверхня садки металу – 50 м², об'єм робочої камери $V_{рк} = 85$ м³, об'єм садки металу $V_m = 25$ м³, тобто коефіцієнт заповнення $K_z = V_m/V_{рк}$ становить $\sim 0,3$; значення сумарних коефіцієнтів теплопередачі від пічних газів до металу ($\alpha_{м\Sigma}$) та від пічних газів до кладки печі ($\alpha_{кл\Sigma}$) складають 0,30 і 0,25 кДж/(м·с·К), відповідно. Згідно з результатами розрахунків мають $T_{кл} = 7,90$ год., $T_m = 0,20$ год., $T_n = 0,001$ год.

Як видно відмінність постійних часу нагрівання становить один-три порядки та найменш інерційними слід вважати пічні гази, тобто є можливість понизити

ступінь диференціального рівняння, прирівнюючи $T_n = 0$. Враховуючи, що будь-яке спрощення моделі призводить до додаткової погрешності, його слід виконувати виходячи з конкретних особливостей нагрівання. Так, за невеликих значень коефіцієнта заповнення K_3 та теплової обробки матеріалу з малою теплоємністю (наприклад, випалення матеріалів) параметри T_n і T_m можуть бути порівнянними за величиною, тому слід відповідно збільшувати постійні часу нагрівання, які враховують, або вводити додаткове запізнювання за часом.

Для печей, що працюють з постійною температурою пічних газів, можливим є виключення з моделі позитивного зворотного зв'язку й аперіодичної ланки, яка відповідає за кладку печі. За реальних умов, коли кладка печі є прогрітою, у період завантаження нової партії металу спостерігають тільки охолодження її поверхневого шару. Після завантаження металу за наступного подавання палива до печі відбувається швидке прогрівання кладки, тобто її акумулятивні властивості не проявляються. У такому разі рівняння теплового балансу для робочого об'єму печі враховує тільки втрати теплоти через кладку, а динаміка кладки печі може бути апроксимованою інтегруючою ланкою у вигляді

$$W_{кл}(p) = \frac{\theta_{кл}(p)}{\theta_n(p)} = \frac{1}{T_{кл} \cdot p} \quad (14)$$

За циклічної роботи печей на нагрівання й охолодження разом з металом модель слід доповнювати початковими умовами – температурами кладки печі та садки металу. Відмінність за величиною постійних часу призводить до різних значень швидкості нагрівання металу та кладки печі. У зв'язку з цим температура пічних газів, характеризуючи в цілому тепловий стан системи «пічні гази – кладка печі – метал», неоднозначно характеризує рівень температури металу.

Отримана динамічна модель за наявності прямої або непрямої оцінки температури металу дозволить визначити оптимальний алгоритм управління. За рахунок зниження до першого (чи максимум до другого) порядку диференціального рівняння для системи «пічні гази – кладка печі – метал» є можливими як спрощення оператора оптимального пристрою, що управляє, так і його практична реалізація.

Висновки

Математична модель динаміки нагрівання у полумєневих печах камерного типу в лінійному наближенні представляє сукупність трьох аперіодичних ланок першого порядку, що охоплена позитивним зворотним

зв'язком. Під час вирішення задачі оптимізації спрощення моделі є можливим виключенням постійних часу нагрівання пічних газів або кладки печі, вибирання яких слід виконувати виходячи з конструктивних особливостей печі, режиму її роботи, а також теплофізичних параметрів металу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бутковский А. Г. Обзор некоторых новых направлений, идей и результатов в проблеме управления системами с распределенными температурами. / А. Г. Бутковский // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1983. – № 2. – С. 112-122.
2. Бутковский А. Г. Применение принципа максимума для оптимизации температурного режима печей / А. Г. Бутковский, Э. М. Гольдфарб, Э. С. Гескин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1967. – № 7. – С. 173-177.
3. Вырк А. Х. Управление нагревом массивного тела с учетом ограниченный на термонапряжения / А. Х. Вырк // Автоматика и телемеханика. – 1972. – № 5. – С. 185-188.
4. Капустин Е. А. Программирование нагрева металла по расходу топлива с учетом технологических ограничений / Е. А. Капустин, Л. Э. Гольдфарб, Г. Н. Сидорин и др. // Известия вузов. Черная металлургия. – 1980. – № 7 – С. 114-118.
5. Гольдфарб Э. М. Оптимальный режим нагрева металла по критерию минимума суммарной стоимости расходуемого топлива и потерь металла на окисление / Э. М. Гольдфарб, В. С. Ибраев // Известия вузов. Черная металлургия. – 1971. – № 12. – С. 144-148.
6. Минаев А. Н. К вопросу нагрева тонких тел с заданной точностью / А. Н. Минаев, В. Я. Гринберг, В. М. Ольшанский, Ю. С. Борбоц // Известия вузов. Черная металлургия. – 1975. – № 7. – С. 184-186.
7. Крылова Л. С. Расчет теплообмена в камерной нагревательной печи с учетом неизотермичности газового объема / Л. С. Крылова, В. А., Горбунов // Металлургическая теплотехника. – Днепропетровск : МетАУ, 1989. – Т. 2. – С. 167-168.
8. Губинский В. И. Теория пламенных печей / В. И. Губинский, Лу. Чжун-У. – М. : Машиностроение, 1995. – 256 с.
9. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем / А. А. Фельдбаум. – М. : Физматгиз, 1963. – 623 с.

пост. 25.07.2016