

ІННОВАЦІЙНЕ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ У ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОСТОРОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Актуальність. У роботі вирішено актуальну задачу розробки інноваційної системи управління процесом нагрівання металу у камерній печі.

Мета – розробка алгоритму управління процесом нагрівання металу з додатковим використанням у якості керуючого впливу просторового електричного поля у камері печі.

Метод. За загальновідомими методиками планування експерименту одержано регресійну модель реальної камерної печі з врахуванням величини напруги між пальником і садкою металу, яка і покладена в основу алгоритму.

Результати. Розроблено систему управління камерною піччю, у якій за створеним алгоритмом визначаються оптимальні значення керуючих впливів на кожному кроці циклу нагрівання. Запропонована система управління є універсальною, оскільки після прорахунків видає динаміку, за якою потрібно змінювати величину постійної напруги та подачу газу з кроком у часі j для виконання будь-якого заданого режиму термічної обробки металу. Проведені експериментальні дослідження на реальній камерній печі з вкатним подом на ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» це підтвердили. Аналіз отриманих графіків зміни температури віддалу металу показав, що при реалізації оптимальних значень керуючих впливів, одержаних за допомогою розробленого алгоритму, спостерігається висока рівномірність й забезпечується краща якість нагрівання металу. Динаміка споживання газу камерною піччю за цикл нагрівання у базовому режимі, без подачі напруги, та за умови її використання у відповідності до виконаної оптимізації засвідчують можливість суттєвого підвищення енергоефективності розглядуваних печей.

Висновки. Вперше доказано можливість і ефективність використання у якості керуючого впливу просторового електричного поля в камері печі, що підтверджує наукову новизну отриманих результатів. Практичне значення досліджень полягає у тому, що розроблений алгоритм управління є універсальним з точки зору режимів термічної обробки металу та може застосовуватись у камерних печах будь-якого промислового підприємства, при цьому за один цикл нагрівання зменшується споживання природного газу більш ніж на 10%.

Ключові слова: алгоритм управління, матриця експерименту, поліноміальна модель, оптимальні керуючі впливи.

НОМЕНКЛАТУРА

b_i – коефіцієнти моделі;

T – температура металу;

U – напруга між пальником і садкою;

U_{\max} – максимальне значення напруги між пальни-

ком і садкою;

U_{\min} – мінімальне значення напруги між пальником

і садкою;

ΔU – крок зміни напруги;

Q – обсяг подачі газу;

Q_{\max} – максимальне значення обсягу подачі газу;

Q_{\min} – мінімальне значення обсягу подачі газу;

ΔQ – крок зміни подачі газу;

τ – час нагрівання;

j – крок за часом;

j_{\max} – максимальне значення кроку за часом;

j_{\min} – мінімальне значення кроку за часом;

$T_{\text{зад}}$ – задана за технологічним режимом температура металу;

$\Delta T_{\text{відх}}$ – технологічно допустиме відхилення температури від заданої;

x – ширина заготівки;

x_{\max} – максимальна ширина заготівки;

x_{\min} – мінімальна ширина заготівки;

y – довжина заготівки;

y_{\max} – максимальна довжина заготівки;

y_{\min} – мінімальна довжина заготівки;

z – висота заготівки;

z_{\max} – максимальна висота заготівки;

z_{\min} – мінімальна довжина заготівки.

ВСТУП

Проблема підвищення енергоефективності камерних печей – це багатопланова задача, найбільш перспективним вирішенням якої на даний час є ефективне управління їх тепловим режимом. З цієї позиції камерні печі відносяться до класу об'єктів періодичної дії. Управління нагріванням зводиться до визначення і реалізації у часі раціональних теплових і температурних режимів, що забезпечують технологічно необхідну динаміку нагрівання металу [1, 2].

Об'єктом дослідження є процес нагрівання металу у камерній печі.

Аналіз сучасного стану роботи камерних печей свідчить про їх невідповідність технологічним вимогам до якості нагрівання металу. В наявних наукових дослідженнях, присвячених управлінню процесом термічної обробки останнього, у якості керуючого впливу використовують тільки витрату природного газу.

Предметом дослідження є енергозберігаюча система управління процесом нагрівання металу у камерній печі.

Метою даної роботи було створення алгоритму управління процесом нагрівання металу у печі з додатко-

вим використанням у якості керуючого впливу просторового електричного поля в її камері.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай $T_{\text{зад}}$ – задана температура металу, а τ – час його нагрівання за температурно-часовим режимом. Останні жорстко регламентовані технологією за усіма фазами процесу термообробки задля досягнення необхідних теплофізичних перетворень. Тоді задача оптимізації полягає у розрахунку значень керуючих впливів для досягнення заданої динаміки температурних змін з мінімальною витратою природного газу, для чого і необхідно розробити відповідний алгоритм.

У якості керуючих впливів запропоновано використати напругу між пальником і садкою U у деякому діапазоні $U \in [U_{\text{min}}; U_{\text{max}}]$ та обсяг подачі газу $Q \in [Q_{\text{min}}; Q_{\text{max}}]$ на кожному кроці за часом $j \in [j_{\text{min}}; j_{\text{max}}]$. Після прорахунків оптимальних співвідношень керуючих впливів за створеним алгоритмом система управління повинна реалізувати послідовність зміни витрати природного газу та електричної напруги для виконання заданого технологічного режиму нагрівання.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

В роботі [3] математично сформульована задача конструктивної оптимізації камерної печі та на основі методу динамічного програмування створено алгоритм оптимального керування подачею газу на піч впродовж всього часу розігріву металевих виробів. Однак наведений алгоритм є досить громіздким щодо практичного використання через складність розробленої моделі. Тому більш цікавими у даному сенсі є технічно менш складний в реалізації новий спосіб управління процесом нагрівання металу.

У статті [4] вперше доказано, що створення теплових бар'єрів у камерних печах за допомогою просторового електричного поля може сприяти підвищенню їх енергоефективності. Для цього використано комплекс програм, що дозволяють прогнозувати з урахуванням турбулентності потоків рух пічних газів у печі, проведено їх математичне моделювання у камері печі [5–10]. В результаті одержано картину полів швидкостей газів в робочому об'ємі та проведено аналіз щодо ефективності їх використання у зоні розташування металевих виробів, що нагріваються. Встановлено, що основна частина теплоти нагріває верхню частину печі і лише потім опускається вниз камери, де гази незначної щільності контактують з металом, при цьому більша їх кількість просто видаляється через димові вікна, не віддавши теплоти. Останнє призводить до перевитрати первинного енергоресурсу та зменшення енергетичної ефективності печі у цілому. Запропоновано створити тепловий бар'єр шляхом направлення деякої кількості останніх перпендикулярно тій їх частині, що видаляються з печі. Доказано, що реалізувати тепловий бар'єр найпростіше шляхом створення просторового електричного поля у камері печі між пальником і садкою металу. Тому дослідницький інтерес і викликає розробка інноваційного алгоритму управління нагріван-

ням металу у камерних печах, де у якості додаткового керуючого впливу буде використовуватись напруга між пальником і садкою металу, що нагрівається.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для створення зазначеного алгоритму на першому етапі були проведені експериментальні дослідження на камерній печі промислового підприємства задля встановлення взаємозв'язку між її параметрами та температурою металевих виробів, що нагріваються. Для досягнення максимальної точності прогнозування за мінімальною кількістю виконаних операцій, а також збереження статистичної достовірності результатів експерименту, було здійснено його планування за загальновідомими методиками [11].

Для розробки матриці експерименту типу 2^5 було обрано кілька факторів, які можуть впливати на розподіл температури всередині печі, а саме: витрата природного газу (Q), м³/год.; напруга між пальником і заготівкою (U), В; габарити заготовки (x, y, z), м [12]. Матрицю діапазону значень досліджуваних параметрів, що враховувались у математичній моделі наведено у табл. 1.

За результатами спланованого таким чином експерименту відповідно до складеної задля цього матриці одержано шукану поліноміальну модель у вигляді:

$$T = f(U, Q, x, y, z) = b_0 + b_1 \cdot U + b_2 \cdot Q + b_3 \cdot x + b_4 \cdot y + b_5 \cdot z + b_6 \cdot (U \cdot Q) + b_7 \cdot (U \cdot x) + b_8 \cdot (U \cdot y) + b_9 \cdot (U \cdot z) + b_{10} \cdot (Q \cdot x) + b_{11} \cdot (Q \cdot y) + b_{12} \cdot (Q \cdot z) + b_{13} \cdot (x \cdot y) + b_{14} \cdot (x \cdot z) + b_{15} \cdot (y \cdot z) + b_{16} \cdot (U \cdot Q \cdot z) + b_{17} \cdot (U \cdot Q \cdot y) + b_{18} \cdot (U \cdot Q \cdot x) + b_{19} \cdot (U \cdot x \cdot y) + b_{20} \cdot (U \cdot x \cdot z) + b_{21} \cdot (U \cdot y \cdot z) + b_{22} \cdot (Q \cdot x \cdot y) + b_{23} \cdot (Q \cdot x \cdot z) + b_{24} \cdot (Q \cdot y \cdot z) + b_{25} \cdot (x \cdot y \cdot z) + b_{26} \cdot (U \cdot Q \cdot x \cdot y) + b_{27} \cdot (U \cdot Q \cdot x \cdot z) + b_{28} \cdot (U \cdot Q \cdot y \cdot z) + b_{29} \cdot (U \cdot x \cdot y \cdot z) + b_{30} \cdot (Q \cdot x \cdot y \cdot z) + b_{31} \cdot (U \cdot Q \cdot x \cdot y \cdot z). \quad (1)$$

На рис. 1 наведено схему запропонованої системи управління камерною піччю, яка включає в себе такі основні блоки як розрахунку оптимальних керуючих впливів за цикл нагрівання, регулятори газу і напруги між пальником та заготівкою та блок визначення відхилень температури від заданої за технологічним режимом.

Таблиця 1 – Діапазон значень факторів, врахованих у математичній моделі

Фактор	Максимальне значення	Мінімальне значення
Q , м ³ /год.	Q_{max}	Q_{min}
U , В	U_{max}	U_{min}
x , м	x_{max}	x_{min}
y , м	y_{max}	y_{min}
z , м	z_{max}	z_{min}



Рисунок 1 – Блок-схема системи управління камерною піччю

Функціонування запропонованої системи управління відбувається наступним чином: у розрахунковий блок 2 вводяться вхідні дані алгоритму з обмеженнями. Розрахунки для визначення оптимальних значень величини напруги та витрати природного газу на кожному кроці виконуються у блоці 2 за розробленим алгоритмом (рис. 2).

Після визначення співвідношень керуючих впливів, які забезпечують досягнення заданої температури на кожному кроці, встановлюється оптимальна послідовність зміни витрати газу та напруги за цикл, яка забезпечить виконання температурного режиму нагрівання з мінімальною витратою природного газу. Потім у відповідності до отриманої послідовності регуляторами 3 і 4 змінюється величина напруги між пальником і садкою металу та подача газу, які й забезпечують виконання заданого графіку нагрівання. У разі відповідності температури заданій, регулятори продовжують реалізувати видану алгоритмом послідовність на наступному кроці. Якщо температура виходить за межі технологічно допустимого відхилення, процес реалізації зупиняється і проводиться визначення нових значень керуючих впливів за цим же алгоритмом на подальші кроки. Запропонована система управління є універсальною, оскільки після розрахунків видає динаміку, за якою потрібно змінювати величину постійної напруги та подачу газу на кожному часовому інтервалі для виконання заданого технологічного режиму нагрівання.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Експериментальні дослідження були проведені на реальній камерній печі відпалу з викатним подом на ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» (ТОВ «ЗТМК»), яка призначена для термічної обробки деталей. Піч опалювалася природним газом та мала чотири працюючі інжекційні пальники. На викатний під площею близько 5м² встановлювалася електропровідна пластина, яка за розміром не перевищувала нижню площину садки металу і витримувала температуру у нагрівальній

камері. До пластини присьднувався ізолюваний провідник струму, який виводився назовні так, щоб не було контакту з корпусом поду (не виникало заземлення). Садку металу масою близько 4500 кг розміщували на викатному поді таким чином, щоб між нею і пластиною зберігався електричний контакт і можна було через наявний отвір у камері печі безконтактним приладом визначити температуру садки в процесі нагріву. Інший ізолюваний провідник струму з таким же перетином закріплювався на інжекційному пальнику таким чином, щоб забезпечувався його електричний контакт з останнім. Протилежні кінці зазначених провідників струму присьднувались до випрямляча з напругою (не більше 1000В) таким чином, щоб на пальнику був нульовий потенціал [13].

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Графіки отриманих значень температур відпалу металу у камерній печі з викатним подом представлені на рис. 3. Температура садки металу в динаміці вимірювалась безконтактними лазерними пірометрами Optris LaserSight. На рисунку 4 показано також одержану динаміку споживання газу камерною піччю за цикл нагрівання.

Аналіз графіків, представлених на рис. 3 показує, що незначне відхилення від заданого температурно-часового режиму не порушує технології нагрівання (близько 120° за годину), швидше досягається потрібна температура металу та спостерігається більш прямолінійна крива відпалу. Все це свідчить про більшу рівномірність й забезпечення кращої якості нагрівання металу. Динаміка одержаних витрат природного газу у базовому режимі, без подачі напруги та отримана за умови подачі напруги між пальником і садкою металу у відповідності до виконаної оптимізації показано на рисунку 4. Скачки на графіках відповідають почерговому включенню та відключенню пальників. За показниками лічильників за один цикл термічної обробки у відповідності до виконаної оптимізації досягнуто скорочення споживання природного газу на 11% [14].

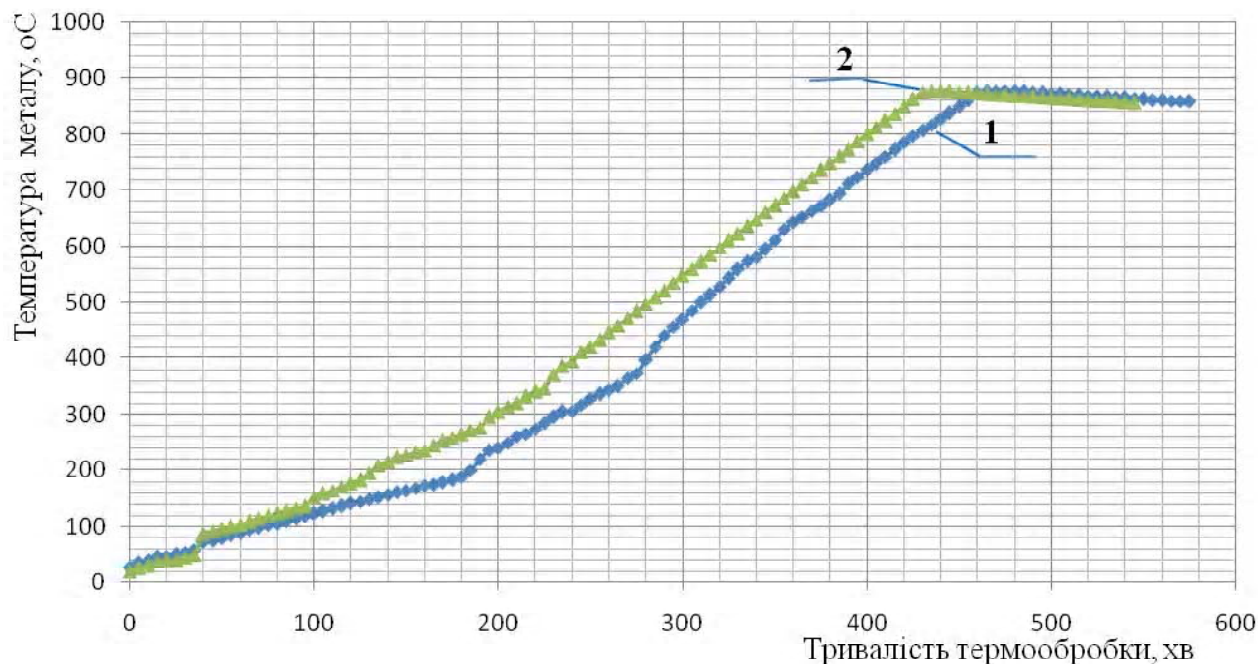


Рисунок 3 – Графіки значень температур відпалу металу у камерній печі:

1 – базовий, необхідний за технологією, 2 – при реалізації оптимальних значень керуючих впливів, отриманих за допомогою наведеного алгоритму

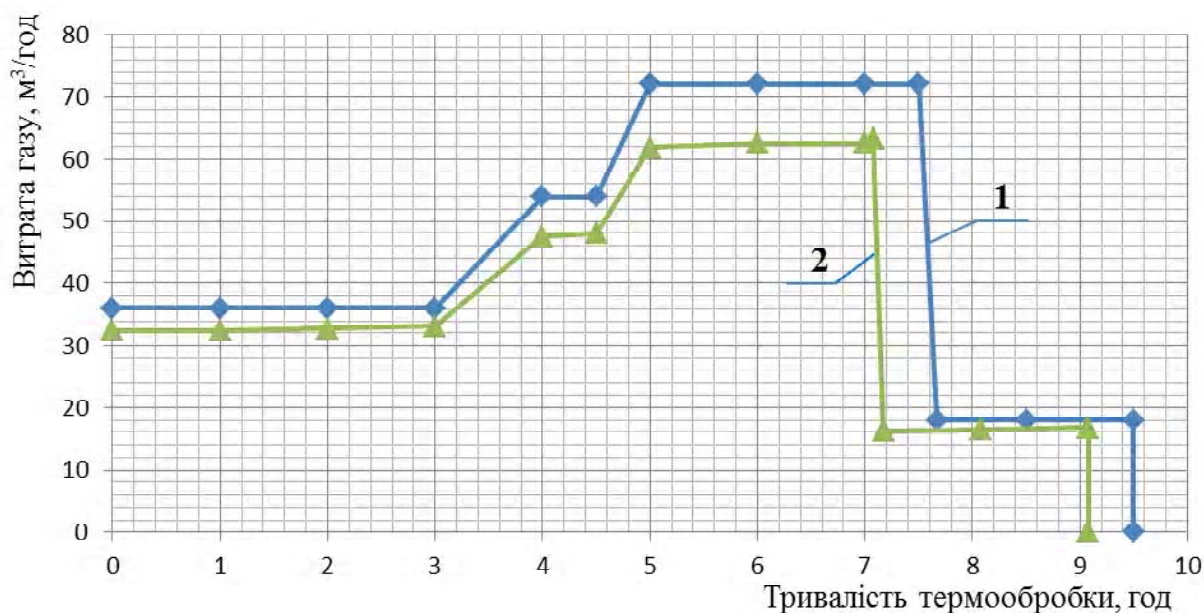


Рисунок 4 – Динаміка споживання газу камерною піччю:

1 – базова, без подачі напруги, 2 – отримана за умови подачі напруги між пальником і садкою металу у відповідності до виконаної оптимізації

6 ОБГОВОРЕННЯ

Запропонований алгоритм управління процесом нагрівання металу з додатковим використанням у якості керуючого впливу просторового електричного поля, який дозволяє суттєво підвищити енергоефективність камерної печі порівняно з алгоритмом конструктивної оптимізації камерних печей на основі переміщення витяжних вікон та місць розташування пальників [3] простіший за технічною реалізацією. Перевагою розробле-

ного алгоритму є те, вперше у якості додаткового керуючого впливу використовується просторове електричне поле, створення якого на реальному підприємстві не потребує значних капіталовкладень та зовнішніх теплоутилізаторів, оскільки теплота продуктів згоряння, що раніше втрачалась з відхідними газами використовується безпосередньо у процесі термічної обробки, що сприяє підвищенню енергетичної ефективності установок у цілому.

ВИСНОВКИ

Згідно з поставленою у цій роботі метою, вирішено задачу щодо розробки інноваційного алгоритму управління процесом нагрівання металу у камерній печі, який підвищує її енергоефективність. Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що вперше доказано можливість використання у якості керуючого впливу просторового електричного поля, що створюється в її камері. Розроблений алгоритм управління є універсальним з точки зору режимів термічної обробки металу та може застосовуватись у камерних печах будь-якого промислового підприємства. При цьому за один цикл термічної обробки можливо скоротити споживання природного газу більш ніж на 10%, що підтверджує його практичну доцільність.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної теми Запорізької державної інженерної академії «Розроблення технології та організація промислового виробництва композиційних матеріалів, стійких в умовах дії високих температур та агресивних середовищ, для авіаційної та космічної техніки» (номер державної реєстрації 011U004839).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Анализ методов математического моделирования процессов теплообмена в промышленных печах для нагрева металла / [В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, Д. В. Менделеев, П. Э. Ратников] // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 2 (85). – С. 102–107.
2. Поливанчук А. С. Моделирование процесса нагрева металла в камерной печи при минимизации расхода топлива / А. С. Поливанчук, С. В. Василец // *Автоматизация технологических объектов та процесів. Пошук молодих : Збірник наукових праць XI науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 17–20 травня 2011 р.* – Донецьк, ДонНТУ, 2011. – С. 64–68.
3. Качан Ю. Г. Оптимальное управление камерной нагревательной печью по энергосберегающему критерию / Ю. Г. Качан, В. В. Степкин, Ю. Б. Лиуш // *Гірнична електромеханіка та автоматика*. – 2013. – № 91. – С. 143–147.
4. Качан Ю. Г. Застосування просторових електричних полів задля створення теплових перешкод у камерних печах /

- Ю. Г. Качан, А. А. Візер, А. В. Сибір // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2017. – № 1. – С. 18–23.
5. Сибір А. В. Моделирование теплообмена в камерной печи с центральной регенеративной горелкой / А. В. Сибір, С. И. Решетняк, В. И. Губинский // *Вісник Дніпропетровського університету. Серія Механіка*. – 2007. – № 2/1. – С. 131–139.
6. Development of turbulence models for shear flows by a double technique: [V. Yakhot, S. Orszag, S. Thangam et. al.] // *Phys. Fluids A*. – 1992. – Vol. 4, № 7. – P. 1510–1520. DOI:10.1063/1.858424.
7. Lauder B. E. The numerical computation of turbulent flow / B. E. Lauder, D. B. Spalding // *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* – 1974. – Vol. 3. – P. 269–289.
8. Dulikravich G. S. Convective heat transfer control using magnetic and electric fields / G. S. Dulikravich, M. J. Colaco // *Journal of Enhanced Heat Transfer*. – 2006. – Vol. 13 (2). – P. 139–155.
9. Huang M. Ehd-enhanced heat and mass transfer: dissertation ... doctor of philosophy / Meirong Huang. – Norman : The University of Oklahoma, 2005. – 152 p.
10. Mahmoudi S. R. Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer and mass transport in gaseous media, bulk dielectric liquids and dielectric thin liquid films: dissertation ... doctor of philosophy / Mahmoudi Seyed Reza. – London : The University of Western Ontario, 2012. – 253 p.
11. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
12. Качан Ю. Г. Методика визначення оптимальних енергетичних параметрів термічної печі, що працює на біогазовій суміші за умови наявності в її камері просторового електричного поля / Ю. Г. Качан, В. Л. Коваленко, А. А. Візер // *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії*. – 2016. – 35 (1). – С. 88–91.
13. Пат. 116305 Україна МПК 2007 C21D 9/00. Спосіб термічної обробки металу у камерних печах періодичної дії / Ю. Г. Качан, А. А. Візер, В. Л. Коваленко (Україна) ; заявник Запорізька державна інженерна академія. – u201612960 ; заявл. 19.12.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9 – 4 с.
14. Качан Ю. Г. Визначення економії споживання промисловим підприємством природного газу за наявності у робочих об'єктах його камерних печей просторового електричного поля / Ю. Г. Качан, В. Л. Коваленко, А. А. Візер // *Енергетика : економіка, технології, екологія*. – 2017. – № 1. – С. 91–94.

Стаття надійшла до редакції 23.08.2017.

Після доробки 11.10.2017.

Качан Ю. Г.¹, Ерофеева А. А.²

¹Д-р техн. наук, професор, заведуючий кафедрою електротехніки та енергоефективності Запорізької державної інженерної академії, Запоріжжя, Україна

²Асистент кафедри електротехніки та енергоефективності Запорізької державної інженерної академії, Запоріжжя, Україна

ИННОВАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ НАГРЕВАНИЯ МЕТАЛЛА В ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Актуальность. В работе решена актуальная задача разработки инновационной системы управления процессом нагревания металла в камерной печи.

Цель – разработка алгоритма управления процессом нагревания металла с дополнительным использованием в качестве управляющего воздействия пространственного электрического поля в камере печи.

Метод. По общеизвестным методикам планирования эксперимента получена регрессионная модель реальной камерной печи с учетом величины напряжения между горелкой и садкой металла, которая и положена в основу алгоритма.

Результаты. Разработана система управления камерной печью, в которой по созданному алгоритму определяются оптимальные значения управляющих воздействий на каждом шаге цикла нагрева. Предложенная система управления является универсальной, поскольку после просчетов выдает динамику, по которой нужно менять величину постоянного напряжения и подачу газа с шагом по времени j для выполнения любого заданного режима термической обработки металла. Проведенные экспериментальные исследования на реальной камерной печи с выкатным подом на ООО «Запорожский титано-магнийский комбинат» это подтвердили. Анализ полученных графиков изменения температуры отжига металла показал, что при реализации оптимальных значений управляющих воздействий,

полученных с помощью разработанного алгоритма, наблюдается высокая равномерность и обеспечивается лучшее качество нагрева металла. Динамика потребления газа камерной печью за цикл нагрева в базовом режиме, без подачи напряжения, и при условии его использования в соответствии с выполненной оптимизацией свидетельствуют о возможности существенного повышения энергоэффективности рассматриваемых печей.

Выводы. Впервые доказано возможность и эффективность использования в качестве управляющего воздействия пространственно-электрического поля в камере печи, что подтверждает научную новизну полученных результатов. Практическое значение исследований заключается в том, что разработанный алгоритм управления является универсальным с точки зрения режимов термической обработки металла и может применяться в камерных печах любого промышленного предприятия, при этом за один цикл нагревания уменьшается потребление природного газа более чем на 10%.

Ключевые слова: алгоритм управления, матрица эксперимента, полиномиальная модель, оптимальные управляющие воздействия.

Kachan Y. G.¹, Yerofieeva A. A.²

¹Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Electrical engineering and energy efficiency of Zaporizhzhya State Engineering Academy, Zaporizhzhya, Ukraine

²Assistant of the Department of Electrical engineering and energy efficiency of Zaporizhzhya State Engineering Academy, Zaporizhzhya, Ukraine

THE INNOVATIVE CONTROL OF THE HEATING UP PROCESS OF THE METAL IN THE FURNACE USING SPATIAL ELECTRIC FIELD

Context. The actual task of developing an innovative control system for the process of metal heating up in the chamber furnace has been solved in the work.

Objective is a creation of an algorithm for the controlling of the heating up of the metal with additional use as the controlling influence of a spatial electric field in the furnace chamber.

Method. A regression model of a real chamber furnace was obtained using well-known experimental design techniques. The model is the basis of the algorithm and takes into account the magnitude of the voltage between the burner and the metal cage.

Results. A control system for the chamber furnace has been developed, in which the optimal values of control actions at each step of the heating cycle are determined according to the created algorithm. The proposed control system is universal, it gives the dynamics of the change in the constant voltage and the gas supply in steps in time j to perform any given mode of heat treatment of the metal. The carried out experiments on a real chamber furnace with a withdrawable hearth at OOO «Zaporizhzhya Titanium and Magnesium Plant» have confirmed this. Analysis of the obtained graphs of the annealing temperature of the metal. There is a high uniformity and a better quality of metal heating when implementing the optimal values of control actions obtained with the help of the algorithm. The dynamics of gas consumption by the chamber furnace during the heating cycle is shown in accordance with the optimization performed without the supply of voltage and with the supply of voltage. The obtained data testify to the possibility of a significant increase in the energy efficiency of the furnaces in question.

Conclusions. For the first time, the possibility and efficiency of using a spatial electric field in the furnace chamber as a control action has been proved, which confirms the scientific novelty of the results obtained. The developed control algorithm is universal from the viewpoint of thermal treatment of metal and can be used in chamber furnaces of any industrial enterprise. During one heating cycle, natural gas consumption is reduced by more than 10%, which confirms the practical importance of research.

Keywords: control algorithm, experiment matrix, polynomial model, optimal control actions.

REFERENCES

1. Timoshpol'skij V. I., Trusova I. A., Mendelev D. V., Ratnikov P. Je. Analiz metodov matematicheskogo modelirovaniya processov teploobmena v promyshlennyh pechah dlja nagreva metala, *Lit'e i metallurgija*, 2012, No. 2(85), pp. 102–107.
2. Polivanchuk A. S., Vasilec S. V. Modelirovanie processa nagreva metalla v kamernoj pechi pri minimizacii rashoda topliva, *Avtomatizacija tehnologichnih ob'ektiv ta procesiv. Poshuk molodih. / Zbirnik naukovih prac' HI nauково-tehničnoj konferencii aspirantiv ta studentiv v m. Donec'ku 17–20 travnja 2011 r. Donec'k, DonNTU*, 2011, pp. 64–68.
3. Kachan Ju. G., Stepkin V. V., Liush Ju. B. Optimal'noe upravlenie kamernoj nagrevatel'noj pech'ju po jenergosberegajushhemu kriteriju, *Girnicha elektromehanika ta avtomatika*, 2013, No. 91, pp. 143–147.
4. Kachan Ju. G., Vizer A. A., Sibir A. V. Zastosuvannja prostorovih elektrichnih poliv zadlja stvorennja teplovih pereshkod u kamernih pechah, *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2017, No. 1, pp. 18–23.
5. Sibir A. V. Reshetnjak S. I., Gubinskij V. I. Modelirovanie teploobmena v kamernoj pechi s central'noj regenerativnoj gorelkoj, *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Serija Mehanika*, 2007, No. 2/1, pp. 131–139.
6. Yakhot V., Orszag S., Thangam S. et. al. Development of turbulence models for shear flows by a double technique, *Phys. Fluids A*, 1992, Vol. 4, No. 7, pp. 1510–1520. DOI:10.1063/1.858424.
7. Lauder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbulent flow, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 1974, Vol. 3, pp. 269–289.
8. Dulikravich G. S., Colaco M. J. Convective heat transfer control using magnetic and electric fields, *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2006, Vol. 13 (2), pp. 139–155.
9. Huang M. Ehd-enhanced heat and mass transfer: dissertation ... doctor of philosophy. Norman, The University of Oklahoma, 2005, 152 p.
10. Mahmoudi S. R. Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer and mass transport in gaseous media, bulk dielectric liquids and dielectric thin liquid films: dissertation ... doctor of philosophy. London: The University of Western Ontario, 2012, 253 p.
11. Adler Ju. P., Markova E. V., Granovskij Ju. V. Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij [Tekst]. Moscow, Nauka, 1976, 279 p.
12. Kachan Ju. G., Kovalenko V. L., Vizer A. A. Metodika viznachennja optimal'nih energetichnih parametriv termichnoji pechi, shho pracuje na biogazovij sumishi za umovi najavnosti v ii kamerni prostorovogo elektrichnogo polja, *Metalurgija : naukovii praci Zaporiz'koji derzhavnoi inzhenernoi akademii*, 2016, 35 (1), pp. 88–91.
13. Kachan Ju. G., Vizer A. A., Kovalenko V. L. Pat. 116305 Ukraïna MPK 2007 C21D 9/00. Cposib termichnoji obrobki metalu u kamernih pechah periodichnoji dii / (Ukraïna); zavjavnik Zaporiz'ka derzhavna inzhenerna akademija. u201612960; zajavl. 19.12.2016; opubl. 10.05.2017, Bjul. № 9, 4 p.
14. Kachan Ju. G., Kovalenko V. L., Vizer A. A. Viznachennja ekonomii spozhivannja promislivim pidpriemstvom prirodnoho gazu za najavnosti u robochih ob'emah jogo kamernih pechej prostorovogo elektrichnogo polja, *Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologija*, 2017, No. 1, pp. 91–94.