

АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 621.391.83

Л.Г. Віхрова, проф., канд. техн. наук, В.А. Бісюк, викл., О.К. Дідик, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна

E-mail: kntubisuk@ukr.net

Автоматичне керування тривалістю індукційного наплавлення

Розглянуто вплив швидкості переміщення деталі в полі індуктора на якість нанесеного композиційного покриття при неперервно-послідовному індукційному наплавленні.

неперервно-послідовне індукційне наплавлення, композиційне покриття

Л.Г. Віхрова, проф., канд. техн. наук, В.А. Бісюк, препод., О.К. Дідик, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна

Автоматическое управление продолжительностью индукционной наплавки

Рассмотрено влияние скорости перемещения детали в поле индуктора на качество нанесенного композиционного покрытия при непрерывно-последовательной индукционной наплавке.

непрерывно-последовательная индукционная наплавка, композиционное покрытие

Постановка проблеми. В різних галузях сучасної промисловості знаходять широке застосування технології індукційного наплавлення зміцнювальних композиційних покриттів (КП) на робочі поверхні деталей. Вони дозволяють отримувати зносостійкі покриття з різними експлуатаційними властивостями: для роботи з ударними навантаженнями, для умов тертя ковзання, антифрикційні покриття, для роботи в агресивних технологічних середовищах, для умов інтенсивного абразивного зношування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Даний спосіб дозволяє отримувати захисні покриття із заданим комплексом властивостей як дрібносерійних партій так і при промисловому виробництві, що в свою чергу забезпечує істотне зниження собівартості продукції.

Найбільш важливим з технологічних факторів, що визначають структуру і властивості наплавлених покриттів при індукційному наплавленні, є температура плавлення дифузійно-легованого наплавочного порошку. Температури плавлення композиційних матеріалів (КМ) для індукційного наплавлення складають понад 1000°C, що значно впливає на якість одержуваного шару, так як нагрів до такої температури може призводити до інтенсивного окислення і до зниження якості наплавленого шару і основи.

Постановка завдання. Мета роботи – розглянути керування швидкістю переміщення деталі і її вплив на якість КП при неперервно-послідовному індукційному наплавленні.

Виклад основного матеріалу. На сучасному етапі розв'язання задач автоматизованого керування режимами індукційного нагрівання (ІН) при наплавленні

КП зводиться, як правило, до синтезу систем стабілізації того або іншого параметра процесу або створенню систем програмного регулювання. Загальні принципи побудови систем стабілізації температурного режиму встановленого для безперервно-послідовного нагрівання і вимоги до якості функціонування цих систем сформульовані в роботах [1, 2]. Як керуючий вплив у синтезованих АСК можуть бути використані: напруга джерела живлення, відносна швидкість переміщення виробу, частота струму. Найбільш розповсюдженим методом керування температурним режимом ІН є в даний час керування напругою джерела живлення нагрівача, що здійснюється з впливом на струм збудження генератора, зі зміною кута регулювання керованого випрямляча і стабілізацією перетворювача частоти, переключення ступенів напруги в установках з регульованими трансформаторами.

Розглянуті в [3, 4] ідеалізовані математичні моделі процесу індукційного нагрівання дозволяють з різним ступенем наближення до реального процесу вивчити статичні і динамічні характеристики об'єкта, необхідні при побудові АСК індукційним наплавленням.

У деяких практично важливих випадках, таких, наприклад, як широко застосовуване у виробництві наскрізне індукційне нагрівання заготовок промислової і більш високих (1000...10000 Гц) частот, достатню для практичних цілей точність дасть апроксимація процесу індукційного нагрівання математичною моделлю нагрівання теплотехнічно тонкого тіла. Дійсно, завдяки наявності внутрішніх джерел тепла рівномірність прогріву по перетину виробу в даному випадку значно вище, ніж при нагріванні зовнішніми джерелами (наприклад, газове нагрівання). При індукційному нагріванні зазначена рівномірність залежить від характеру зміни щільності індукторного струму по радіусу виробу. Закон розподілу щільності струму, у свою чергу, визначається параметром ξ , що характеризує ступінь прояву поверхневого ефекту.

Для наскрізного індуктивного нагрівання для розглянутого класу промислових нагрівачів $\xi = 4$. У цьому випадку температурний градієнт по радіусі заготовки має невелику величину і різниця температур поверхні і центра в процесі нагрівання в реальній ситуації ніколи не досягає критичного значення. Зазначене не відноситься до випадку прискореного нагрівання.

Завдяки такій специфічній особливості процесу наскрізного індукційного нагрівання оцінку температурного режиму можна здійснювати по середній по перетину заготовки температурі на виході з нагрівача, приймаючи її за єдиний параметр, що цілком характеризує тепловий стан об'єкта.

У свою чергу, середня по перетину температура масивної заготовки при її індукційному нагріванні може бути легко представлена (як інтегральний параметр) у формі температури еквівалентного тонкого тіла, теплофізичні характеристики якого визначаються через параметри реального об'єкта.

Така апроксимація дозволяє весь наступний аналіз динаміки досліджуваного процесу ІН і синтез оптимальних алгоритмів керування для розглянутого класу об'єктів виконати для моделі нагрівання теплотехнічно тонкого тіла, оцінюючи, де це необхідно, величину погрішності апроксимації.

Для аналізу передатних властивостей об'єкта ІН з врахуванням розподіленості керуючого впливу функцію залежності температури від координати та тривалості наплавлення $Q(x,t)$ запишемо у відхиленнях від сталого режиму, яке характеризується постійними швидкістю нагрівання $J = const$, температурою навколишнього середовища $\theta_{cp}(t) = \theta_1 = const$ і коефіцієнтом теплових втрат:

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} + \nu \frac{d\Delta\theta}{dx} - kQ(x,t) + \beta_0\Delta\theta = 0, \quad \beta_0 = const, \quad (1)$$

де $\Delta\theta(x,0) = 0$; $\Delta\theta(0,t) = 0$

Застосовуючи до (1) перетворення Лапласа за часом t (оператор p) і по координаті (оператор s) і позначаючи двократні зображення $\theta(x,t)$ і $Q(x,t)$ відповідно через $\theta(p,s)$ і $Q(p,s)$ і одержимо

$$\Delta\theta(p,s) = \frac{k}{p + s\nu + \beta_0} Q(p,s). \quad (2)$$

Вираз

$$R(p,s) = \frac{\Delta\theta(p,s)}{Q(p,s)} = \frac{k}{p + s\nu + \beta_0} \quad (3)$$

можна розглядати як передатну функцію об'єкта керування. (1) для розподіленого виходу $\theta(x,t)$ відносно розподіленого керування $Q(x,t)$, якщо під такою передатною функцією розуміти відношення двократних зображень вихідної і вхідної величин розглянутого об'єкта при нульових початкових умовах.

Передатна функція $R(p,s)$ по (3) є аналогом звичайної передатної функції ланки першого порядку, яка у повній мірі характеризує динамічні властивості об'єкта керування описуваного рівнянням (1). Використовуючи інтеграл згортання двох функцій, одержимо в результаті зворотного перетворення Лапласа по змінній x для $\theta(x,t)$ по (3):

$$\Delta\theta(p,x) = \frac{k}{\nu} \int_0^x e^{-(x-\eta)\frac{-p+\beta_0}{\nu}} Q(p,\eta) d\eta. \quad (4)$$

Тут $\theta(p,x)$ і $Q(p,s)$ звичайні зображення Лапласа відповідно для часу і координати $\Delta\theta(t,x)$ і $Q(t,x)$.

Для об'єкта з розподіленими параметрами зв'язок між вихідними величинами об'єкта і керуючим впливом визначається з (4) на підставі операції згортання:

$$\Delta\theta(x,p) = \frac{k}{\nu} W(p,q,x) Q(p,x), \quad (5)$$

$$\text{де } W(p,q,x) = e^{(x-\eta)\frac{-p+\beta_0}{\nu}} \quad (6)$$

є передатна функція об'єкта з розподіленими параметрами.

Реакція об'єкта $\Delta\theta(p,x)$ на довільний вхідний вплив $Q(p,x)$ може бути знайдена послідовно застосуванням до (3) зворотного перетворення Лапласа за часом відповідно до теореми про згортання двох функцій з наступним використанням теореми зсуву для зображення по змінній x . У результаті згортання одержимо:

$$\Delta\theta(t, s) = L_p^{-1}\left[\frac{k}{p + sv + \beta_0}\right] = k \int_0^t \exp[(-sv + \beta_0)\tau] Q(t - \tau, s) d\tau, \quad (7)$$

$$\Delta\theta(t, x) = k \int_0^t L_s^{-1}[e^{-(sv + \beta_0)\tau} Q(t - \tau, s) d\tau] = k \int_0^{\min t, t_0} \exp(-\beta_0\tau) Q(t - \tau, x - v\tau) d\tau. \quad (8)$$

Звідси маємо:

$$\Delta\theta(t, x) = \begin{cases} k \int_0^{t_0} e^{-\beta_0\tau} Q(t - \tau, x - v\tau) d\tau, & \forall t \leq t_0 \\ k \int_0^t e^{-\beta_0\tau} Q(t - \tau, x - v\tau) d\tau, & \forall t \geq t_0. \end{cases} \quad (9)$$

Для окремого випадку зосередженого керування по сумарній потужності $P(t)$ нагрівання і при заданому характері $F(x)$ її розподілу по довжині нагрівача можна покласти $Q(t, x) = P(t)F(x)$, звідки з (5) одержуємо відповідне вираження для передатної функції об'єкта:

$$W_u(p, x) = \frac{\Delta\theta(p, x)}{P(p, x)} = \frac{k}{v} \int_0^x e^{-(x-\eta)\frac{p+\beta}{v}} F(\eta) d\eta. \quad (10)$$

Крім потужності внутрішніх теплоджерел у якості ймовірних можливих впливів при дослідженні процесу ІН можна розглядати швидкість v просування металу відносно нагрівача і теплофізичні параметри виробів, що нагріваються.

При впливі по цих входах одержимо, лінеаризуючи математичну модель процесу індукційного нагрівання теплотехнічно тонкого тіла, рівняння об'єкта керування в приростах відповідно:

$$\frac{\partial\Delta\theta_v}{\partial t} + v \frac{\partial\Delta\theta_v}{\partial x} + \left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)_{t=0} \Delta v + \beta\Delta\theta_v = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial\Delta\theta_\beta}{\partial t} + v \frac{\partial\Delta\theta_\beta}{\partial x} + \theta_0(x) \Delta\beta + \beta\Delta\theta_\beta = 0. \quad (12)$$

При $v = const$ і $\beta = const$ рівняння відповідають вихідному сталому режиму нагрівання:

$\theta_0(x)$ і $\left(\frac{d\theta}{dx}\right)_{t=0}$ - температурне поле і його градієнт для цього вихідного режиму;

$\Delta v(t)$ і $\Delta\beta(t)$ - вхідні впливи у відхиленнях від сталого значення $v = const$ і $\beta = const$.

Передатні функції об'єкта керування по розглянутих каналах можуть бути отримані безпосередньо з (18)

$$W_v(p, x) = \frac{\Delta\theta_v(p, x)}{\Delta v(p)} = \frac{k}{v} \int_0^x e^{-(x-\eta)\frac{p+\beta}{v}} \left(\frac{d\theta}{dx}\right)_{t=0} d\eta, \quad (13)$$

$$W_{\beta}(p, x) = \frac{\Delta\theta_{\beta}(p, x)}{\Delta\beta(p)} = \frac{k}{\nu} \int_0^x e^{-(x-\eta)^{\frac{p+\beta}{\nu}}} \theta_0(\eta) d\eta. \quad (14)$$

Аналогічно, після зазначеної заміни $Q(x, t)$ одержуємо вираження для відповідних реакцій $\Delta\theta(x, t)$ у формі (9). Функція $\theta_0(x)$ і $\left(\frac{d\theta(x)}{dx}\right)$ знаходяться як рішення, (1) і при:

$$d\theta/dt=0 \quad V(t)=V \quad \beta(x, t)=\beta \quad Q(x, t)=F(x)P(t)$$

для частного випадку сталої потужності нагрівання по довжині індуктора, коли в сталому режимі $Q(x, t)=P=const$ у і $F(x)=I$ у (1), маємо:

$$\theta_0(x) = \frac{kP}{\nu} (1 - e^{-\frac{\beta x}{\nu}}) \quad \left(\frac{d\theta(x)}{dx}\right)_{t=0} = \frac{kP}{\beta} e^{-\frac{\beta x}{\nu}}. \quad (15)$$

Звідси з врахуванням (15) з (10) і (13), (14) знайдемо:

$$W_u(p, x) = \frac{k}{p + \beta} (1 - k_0(x) e^{-\frac{p x}{\nu}}), \quad (16)$$

$$W_{\nu}(p, x) = \frac{kP}{p} k_0(x) (1 - e^{-\frac{p x}{\nu}}), \quad (17)$$

$$W_{\beta}(p, x) = \frac{kP}{\beta_0} \left[\frac{1 - k_0(x) e^{-\frac{p x}{\nu}}}{p + \beta_0} + \frac{k_0(x)}{p} (1 - e^{-\frac{p x}{\nu}}) \right] \quad (18)$$

Для випадку рівномірного розподілу потужності джерел, що гріють, по довжині нагрівача побудовані частотні характеристики об'єкта по всіх основних каналах впливу згідно (16) – (18).

Висновки. З огляду на той факт, що точність нагрівання є необхідною умовою для забезпечення високої якості виробів і зниження браку та енерговитрат, необхідно розробити автоматичну систему керування АСК роботою установки індукційного наплавлення, яка забезпечить точне дотримання температури нагрівання та мінімально необхідну тривалість наплавлення.

Після запуску установки, якщо початкові параметри процесу наплавлення постійні і збуджуючі впливи навколишнього середовища мінімальні, то можна вважати, що система буде працювати у відносній рівновазі. Збуджуючі впливи будуть компенсуватись за допомогою програмно-технічних засобів в заданому інтервалі зміною тривалості витримки ділянки деталі, що підлягає наплавленню в полі індуктора при заданій температурі, або швидкістю переміщення деталі при неперервно-послідовному наплавленні.

Автоматична система керування, яка забезпечить достатньо точне та гнучке керування швидкістю переміщення деталі, напругою та частотою струму на індукторі дозволить витримувати оптимальну температуру нагрівання, мінімізувати час наплавлення, поверхня деталі буде прогріватися, що забезпечить високу якість покриття і дозволить зменшити енерговитрати процесу ІН.

Список літератури

1. Боль, А.А. Повышение качества индукционной наплавки путем оптимизации и автоматизации нагрева [Текст] / А.А. Боль, В.П. Тимошенко, В.Н. Коваль.– Изв. СО АН СССР. сер. Технические наук, 1989. – Вып. 1. – С. 85-90.
2. Бісюк, В.А. Автоматичне керування неперервно-послідовним індукційним наплавленням [Текст] / В.А. Бісюк, О.К. Дідик // Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2015. – Вип. 28. – С. 250-255.
3. Индукционная наплавка твердых сплавов [Текст] / В.Н. Ткачѳв, Б.М. Фиштейн, Н.В. Казинцев, Д.А.Алдырев. – М.: Машиностроение, 1970. – 182с.
4. Гжвачевский, М. С. Математическое моделирование оптимального управления процессом индукционного нагрева [Текст] : автореф. дис. ... доктора физико-математических наук : спец. 05.13.16. / Гжвачевский Марек Стефанович. – Москва, 1991. – 46 с.

Larysa Vihrova, Prof., Phd tech. sci., Viktor Bisuk, Lect., Olexandr Didyk, Assoc. Prof., Phd tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Automatic control of the duration of induction welding

With constant generator of high frequency working mode affect the temperature of the land induction welding surface by changing the speed of moving parts in the field of the inductor. This allows you to increase or decrease capacity enerhovnesku zone heating; provides a more even distribution of temperature on the surface of the part; Extra or reheat if the output of the inductor temperature treated area is insufficient for high quality welding.

Given the fact that the accuracy of heat is essential to ensure high product quality and reduce energy consumption and lack of need to develop an automated control system ASC induction welding installation work that will ensure strict observance of the heating temperature and the minimum required length of welding.

continuous-sequential induction welding, composite coating

Одержано 22.05.17

УДК 681.513.5

Oleksiy Lobok, Assoc. Prof., Phd phys.&math. sci., Boris Goncharenko, Prof., DSc.

National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

Larisa Vihrova, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

E-mail:VIHROVALG@ukr.net

Optimal control of linear dynamic distributed systems under uncertainty

The article considers the problems of synthesis of optimal control systems that operate in conditions of an uncertain information and are described by generalized equations in partial derivatives of parabolic type. Control has the form of feedback from the observed measurements for the implementation of which it is necessary to solve integral-differential equation of Riccati. Separately built distributed and concentrated limiting regulators and are recursive algorithm for determining the optimal control regarding changes in the number of observations. There is an algorithm designed for determining the required number of point regulators and their optimal location on the border of the field in which the quality criterion does not exceed a specified threshold.

minimax control, point boundary regulators, Sobolevski spaces, inequality of Rayleigh, bilinear form