

Л.Г. Віхрова, проф., канд. техн. наук, В.В. Аулін, проф., канд. ф-м. наук,
В.А. Бісюк, асп.

Кіровоградський національний технічний університет

Математичні моделі процесу індукційного нагрівання поверхонь деталей для автоматичної системи управління наплавленням композиційних покриттів

Наведено аналіз загальної математичної моделі процесу індукційного нагрівання (ІН) робочих поверхонь деталей машин і запропоновано ідеалізовані математичні моделі індукційного нагрівання, які дозволяють з різним ступенем наближення до реального процесу вивчити статичні і динамічні характеристики необхідні при побудові АСУ технологічним процесом індукційного наплавлення зміцнюючих композиційних покриттів.

індукційне наплавлення, індукційне нагрівання, композиційне покриття, автоматична система управління, статичні і динамічні характеристики, ідеалізована математична модель

Вступ. Процес індукційного нагрівання композиційного покриття (КП) характеризується складними взаємодіями електромагнітних і теплофізичних параметрів системи «індуктор-деталь-покриття» з температурою матеріалу деталі і покриття, зміною їх за часом і по об'єму і площині деталі. Це визначає відповідний підхід до індукційного нагрівача як об'єкта автоматичного управління з розподіленими параметрами.

Нагрівання композиційного матеріалу при індукційному способі нанесення КП відбувається переважно за рахунок передачі теплової енергії з поверхні деталі в шихту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

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 [1,5,6]. Загальні принципи побудови систем стабілізації температурного режиму встановленого для безперервно-послідовного нагрівання і вимоги до якості функціонування цих систем сформульовані в роботах [6,7,8]. Як керуючий вплив у синтезованих АСУ можуть бути використані: напруга джерела живлення, відносна швидкість переміщення виробу, частота струму, параметри коливального контуру. 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 зі стабілізацією перетворювача частоти, переключення ступеней напруги в установках з регульованими трансформаторами.

У роботах [5,8,9] розглядаються деякі питання синтезу і досліджується область стійкості АСУ режимами ІН з машинним генератором, що являє собою аперіодичну ланку; сам об'єкт представлений у виді теплотехнічно тонкого тіла. Показано, що для збільшення області стійкості системи бажане застосування ПД – закону регулювання.

Питання аналізу і синтезу АСУ температури виробів на виході з нагрівача при їхньому дискретному просуванні розглянуті в роботі [9]. Однак, тут регулювання

температури заготовок здійснюється в межах кроку, що аналогічно нагріванню нерухомих виробів з фіксованою тривалістю нагрівання. Відповідно до зазначеної обставини дослідження динамічних властивостей АСУ тут проводиться без врахування руху об'єкта.

Питання динаміки АСУ індукційним нагріванням рухомих деталей, за прямим і непрямим параметрами розглянуті в роботах [4,5,7]. На підставі аналізу основних факторів, згідно яким формується структура АСУ режиму ІН, виділено чотири структури, що відрізняються наявністю інерційних ланок І, ІІ, ІІІ порядків, і досліджена динаміка зазначених структур для реальних параметрів об'єкта. Проведено аналіз стійкості систем програмного керування ІН при введенні ПІ, ПД, ПІД – законів регулювання і дано рекомендації з вибору параметрів настройки регуляторів. Показано можливість створення універсального програмного регулятора, що з'єднає керування за прямим і непрямим параметрами.

Найбільш загальні принципи керування об'єктом ІН сформульовані в роботах [2,8]. На підставі отриманих аналітичним методом передатних функцій об'єкта виконано аналіз динаміки АСУ теплового режиму процесу ІН. Показано, що АСУ теплового режиму ІН схильна при досить великому коефіцієнті підсилення до незатухаючих коливань.

Динамічні властивості АСУ ІН істотно залежать від характеру розподілу потужності уздовж зони нагрівання. Для стійкості процесу рекомендується забезпечити зростаючий або принаймні неспадаючий характер розподілу потужності нагрівання уздовж індуктора.

Метою даної роботи є аналіз загальної математичної моделі процесу індукційного нагрівання (ІН) робочих поверхонь деталей машин і розробка ідеалізованих математичних моделей ІН, які дозволяють з різним ступенем наближення до реального процесу вивчити статичні і динамічні характеристики необхідні при побудові АСУ технологічним процесом індукційного наплавлення зміцнюючих композиційних покриттів.

Процес індукційного нагрівання матеріалу деталі СВЧ описується в загальному випадку взаємозалежною системою рівнянь Максвелла і Фур'є для електричного і теплового [8] полів:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\delta} \\ \operatorname{div} \vec{H} = 0 \\ c(\theta)\rho(\theta)\frac{d\theta}{dt} - \operatorname{div}[\lambda(\theta)\operatorname{grad}\theta] + v \cdot \operatorname{grad}\theta = W(h,\theta) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0 \end{array} \right. ; \quad (1)$$

де \vec{B} – магнітна індукція;

\vec{E} – напруженість електричного поля;

\vec{H} – напруженість магнітного поля;

θ – температура виробу, що нагрівається;

$\lambda(\theta)$, $c(\theta)$, $\rho(\theta)$ – коефіцієнти теплопровідності, теплоємності і питомого опору матеріалу заготовки;

v – швидкість відносного переміщення заготовки й індуктора;

$W(h,\theta)$ – функція розподілу внутрішніх джерел тепла.

Система рівнянь (1) у загальному випадку аналітично розподілена відносно розподілу температури тіла, що нагрівається, у часі і просторі. Однак, відомий ряд

практично важливих ситуацій, при дослідженні яких можна ввести допущення, які не змінюють сутності явища, але значно спрощують рішення задачі [2,3,4]:

- мала інерційність електромагнітних процесів у порівнянні з тепловими дає можливість при вивченні нестационарних теплових режимів знехтувати впливом перехідних процесів електромагнітного поля.

- у типових ситуаціях, що характеризуються великою величиною відношення довжини нагрівача до діаметра заготовки, впливом крайових ефектів можна знехтувати.

- при досить великій потужності, виділюваної в процесі нагрівання в поверхневому шарі заготовок, величина теплового потоку в радіальному напрямку принаймні на порядок більше, що свідчить про те, що передачею тепла по осі заготовок можна знехтувати, тобто прийняти $\lambda_x = 0$.

З урахуванням прийнятих допущень процес індукційного нагрівання циліндричної заготовки радіусом R може бути представлений неоднорідним диференціальним рівнянням теплопровідності Фур'є, що у циліндричних координатах приймає вид [1,2,9].

$$\gamma(\theta) \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dr} \left[\lambda_r(\theta) \frac{d\theta}{dr} + \frac{\lambda_t(\theta)}{r} \frac{d\theta}{dr} \right] - \gamma(\theta) \nu(t) \frac{d\theta}{dx} + W(r, x, \theta, P) \quad (2)$$

де r - радіальна координата об'єкта;

γ -питома вага матеріалу заготовки;

P - потужність джерел тепловиділення;

λ_r, λ_x - коефіцієнти теплопровідності, що враховують анізотропність властивості деталі, що нагрівається, по координатах.

Як відзначалося вище, специфічною особливістю процесу індукційного нагрівання металу є нерівномірний розподіл потужності внутрішніх джерел тепловиділення по об'єму виробу, що нагрівається, обумовлений залежністю електромагнітних і теплофізичних параметрів об'єкта від температури виробу. Найбільш різко виражена суттєво нелінійна залежність величини магнітної проникності від температури при нагріванні феромагнітних заготовок до температур, що перевищують точку магнітних перетворень.

Залежність теплофізичних параметрів $\lambda(\theta), c(\theta), \rho(\theta)$ також носить суттєво нелінійний характер. Однак, при дослідженні деяких конкретних режимів нагрівання виявляється можливим, прийняти усереднені значення цих параметрів [6,8].

Враховуюче зазначене, процес індукційного нагрівання можна представити у вигляді:

$$\frac{d\theta}{dt} = a \left[\frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\theta}{dr} \right] - \nu(t) \frac{d\theta}{dx} + \frac{W(r, x, \theta, P)}{\gamma c} \quad (3)$$

де $a = \lambda / (\gamma c)$ коефіцієнт температуропровідності.

В ряді робіт [2,5,9], присвячених рішенням задач теплопровідності з урахуванням об'ємного розподілу джерел тепла, що нелінійно залежить від температури, складна нелінійна залежність розподілу потужності внутрішніх джерел тепла від температури по довжині нагрівача апроксимується східчастою функцією координати, яка, як правило, має три ділянки сталості, у межах кожного з яких фізичні властивості сталі вважаються постійними. У «холодній» зоні нагрівання, де температура будь-якої точки перерізу заготовки нижче температури магнітних перетворень, джерела тепла практично зосереджені на поверхні виробу, і процес нагрівання можна розглядати при граничних умовах II роду без врахування внутрішніх джерел тепла.

У «проміжній» зоні, де шари металу, починаючи від поверхні, проходять при нагріванні точку Кюрі, магнітна проникність від шару до шару різко змінюється, приводячи до невизначеності закону розподілу потужності джерел нагрівання по об'єму виробу.

У „гарячій” зоні нагрівання заготовки втрачають феромагнітні властивості і закон розподілу джерел тепла по радіусі виробу визначається однозначно як для парамагнітного тіла. Для цієї зони характер розподілу потужності теплових джерел по довжині можна вважати постійним [4,9].

Прийнята апроксимація дозволяє виключити нелінійну залежність функції розподілу джерел тепла від температури, замінивши її відомою функцією від просторової координати. З врахуванням зазначеного маємо:

$$\frac{d\theta}{dt} = a \left[\frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\theta}{dr} \right] - \nu(t) \frac{d\theta}{dx} + \frac{W(r, x, P)}{c\gamma}. \quad (4)$$

Для одержання однозначного рішення необхідно використовувати відповідні крайові умови, що задають початковий стан і закон теплообміну на поверхні тіла, що нагрівається.

При дослідженні процесу індукційного нагрівання теплотехнічно тонкого тіла математична модель процесу може бути представлена у вигляді [2,4]:

$$\frac{d\theta}{dt} = \nu(t) \frac{d\theta}{dx} + \frac{1}{c\gamma} Q(x, t) - \beta(\theta) [\theta - \theta_{cp}(t)]. \quad (5)$$

$$\text{Тут } \beta(\theta) = \frac{2\alpha(\theta)}{c\gamma R},$$

де $\alpha(\theta)$ – коефіцієнт теплообміну між поверхнею виробу, що нагрівається, і середовищем. Для теплотехнічно тонкого тіла ця залежність також може бути представлена як функція координати x .

У випадку фіксованого закону визначення внутрішніх джерел функцію $Q(x, t)$ можна представити у вигляді:

$$Q(x, t) = F(x)P(t), \quad (6)$$

$$\text{де } F(x) = F_1(x)[1 - l(x - x_1)] + F_2(x)l(x - x_1); \quad (7)$$

$l(x - x_1)$ - одинична функція Хевісайда;

$F_1(x)$ і $F_2(x)$ - функції розподілу потужності теплогерел по довжині нагрівача, що вироджуються в силу прийнятих допущень у постійні величини для стадії нагрівання величини; x_1 - координата, що відповідає температурі магнітних перетворень (точки Кюрі).

Однією зі складних проблем, що виникають при дослідженні процесу індукційного нагрівання, є врахування впливу теплових втрат, що є в загальному випадку функцією температури і теплофізичних характеристик матеріалу виробу і індуктора. Складність врахування полягає в тім, що тепловий потік у міру просування виробу до виходу з нагрівача змінює свою величину і напрямок. Для точного врахування втрат необхідно досліджувати температурне поле системи «метал - індуктор». Рішення задачі, навіть при деякій ідеалізації процесу, можливо тільки чисельними методами [6,9].

У роботі [9] на підставі експериментальних даних отримана емпірична формула для визначення питомої потужності теплових втрат через футерівку, що дозволяє з великою точністю визначити теплові втрати нагрівача, що розраховується.

У нагрівачах методичної дії теплові втрати визначаються в основному гарячою ділянкою [9], для якої температура футерівки в сталому режимі роботи дорівнює температурі виробу, що нагрівається, у відповідній координаті нагрівача. При цьому також без великої погрішності можна вважати, що процес ІН відбувається при втратах, пропорційних рівності температур поверхні виробу і навколишнього середовища, тобто рівняння (5) з врахуванням (7) та (6) перетвориться до вигляду:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\nu(t) \frac{d\theta}{dx} + kP(t)F(x) - \beta[\theta - \theta_{cp}(t)], \quad (8)$$

де $k=1/(\gamma c)$.

У випадку рівномірного розподілу потужності теплогерел по довжині нагрівача математична модель процесу ІН для «тонкого» тіла цілком ідентична математичної моделі процесу нагрівання зовнішніми джерелами тепла.

Висновки

Запропоновані ідеалізовані математичні моделі процесу індукційного нагрівання дозволяють з різним ступенем наближення до реального процесу вивчити статичні і динамічні характеристики об'єкта, необхідні при побудові АСУ індукційним наплавленням композиційних покриттів.

Список літератури

1. Аулін В.В. /Керування та моніторинг процесів приготування композиційних матеріалів та нанесення композиційних покриттів на деталі машин/ Аулін В.В., Віхрова Л.Г., Бісюк В.А., Бобрицький В.М.; //Вісник Харківського нац. техн. університету сільск. господарства./ Вип. 37. Проблеми енерго-забезпечення та енерго-збереження в АПК України. Том 2. – Харків. – 2005.- С.174-178
2. Безменов Ф.В. Некоторые особенности протекания процесса нагрева цилиндрических деталей при заданных значениях температуры на поверхности и глубине закалки/ Безменов Ф.В. // Индукционный нагрев. – 2008. - №5. – С. 3-11.
3. Головин Г.Ф., Зимин Н.В. /Технология термической обработки металлов с применением индуктивного нагрева/. – Л.: Машиностроение 1990. 87 с.
4. Боль А.А. Регулирование режима работы высокочастотного генератора при индукционной наплавке/ Боль А.А., Коваль В.Н., Тимошенко В.П. Экспресс-информ. – М.:ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш, 1984.-219 с. - (Сер. 3. Технология и автоматизация производства. Отеч. Опыт: Вып.1).
5. Головин Г.Ф. Технология термической обработки металлов с применением индуктивного нагрева/ Головин Г.Ф., Зимин Н.В. – Л.: Машиностроение. – 1990.- 254 с.
6. Деклараційний патент на винахід України №23872. МПК H05B. 6/06 Спосіб автоматизації керування температурою індукційного наплавлення композиційного покриття/ Аулін В.В., Віхрова Л.Г., Бісюк В.А., Бобрицький В.М.; заявник та патентовласник Кіровоградський нац. тех. Університет, заявлено 29.01.2007, опубліковано 11.06.2007, Бюл. №8.
7. Віхрова Л.Г. /Перспективи розвитку автоматичного управління технологічним процесом наплавлення композиційних покриттів/ Віхрова Л.Г., Аулін В.В., Бісюк В.А., Гамалій В.Ф. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного університету. - 2008. - № 21. - С. 35-39.
8. Ландау Л.Д./Теоретическая физика. Том 2. Теория поля/ Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.// Издательство: Физматлит. – 2003. – 654 с.
9. Бодажков В.А., /Объёмный индукционный нагрев./ Бодажков В.А.// СПб: Политехника.1992 - 72с.

Л. Вихрова, В. Аулін, В. Бісюк

Математические модели процесса индукционного нагревания поверхностей деталей для автоматической системы управления наплавлением композиционных покрытий

Приведен анализ общей математической модели процесса индукционного нагрева рабочих поверхностей деталей машин и предложены идеализированные математические модели индукционного нагрева, которые позволяют с разной степенью приближения к реальному процессу изучить статические и динамические характеристики необходимые при построении АСУ технологическим процессом индукционной наплавки укрепляющих композиционных покрытий.

L. Vihrova, V. Aulin, V. Bisuk

Mathematical models of induction heating process of details surfaces for automatic system control by facing composition coatings

The analysis of general mathematical model of induction heating process working surfaces of machine parts and proposed idealized mathematical model of induction heating, which allow different degrees of approximation to the real process to examine static and dynamic characteristics required in the construction of ASC by process of induction hardening composite coating deposition.

Одержано 06.04.11

