

Л.Г. Віхрова, проф., канд. техн. наук, В.А. Бісюк, асп., Є.П. Босов, доц.
Кіровоградський національний технічний університет

Математичні основи процесу індукційного нагрівання деталей машин і наплавлення композиційних покриттів

Наведено результати аналізу досліджень систем і принципів керування технологічним процесом індукційного наплавлення зміцнюючих композиційних покриттів, розглянуто задачу забезпечення незалежності якості процесу нанесення КП від впливу зовнішніх факторів і проблеми автоматизації технологічного процесу індукційного наплавлення, запропоновано математичну модель для процесу індукційного нагрівання теплотехнічно тонкого тіла.

індукційне наплавлення, композиційний матеріал, композиційне покриття, керування технологічним процесом, автоматизація процесу

© Л.Г. Віхрова, В.А. Бісюк, Є.П. Босов, 2010

Постановка проблеми

Найбільш поширеним способом зміцнення робочих поверхонь деталей сільськогосподарської техніки є індукційне наплавлення композиційних покриттів (КП). В його основі лежать процеси нагрівання і розплавлення присадного матеріалу струмами високої частоти (СВЧ). Для наплавлення використовується спеціальна порошкоподібна шихта, що складається з гранульованого твердого сплаву і флюсів на основі бури і борного ангідриду в певному ваговому співвідношенні. Шихту наносять на поверхню, що підлягає наплавленню, вводять в спеціальний індуктор високочастотної установки. Джерелом живлення, як правило, служать лампові високочастотні установки типу ЛЗ, ВЧС і ВЧГ або транзисторні ФД, ВГТ, СЧГ.

Постійне зростання вимог до якості композиційних покриттів та енергозбереження обумовлює підвищення потреб до керованості технологічних процесів індукційного наплавлення КП. Ці вимоги можна задовільнити шляхом розробки та впровадження сучасних засобів автоматизації процесів управління основними етапами індукційного наплавлення КП.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як показав аналіз наукових публікацій, на сьогодні задача комплексної автоматизації процесу зміцнення робочих поверхонь деталей індукційним наплавленням композиційних покриттів не вирішена в повному обсязі. Найбільш загальні принципи керування об'єктом індукційного нагрівання (ІН) сформульовані в роботах [1,2]. 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, що приводить до термічної деформації деталей та енергетичних перевитрат.

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. Але залишається невирішеною задача забезпечення

незалежності якості процесу нанесення КП від впливу зовнішніх факторів, вимагають вдосконалення методи і алгоритми вимірювання і регулювання температури КП в процесі наплавлення, що враховують наявність невизначеностей при синтезі регулюючих дій, завдання адаптації моделей і алгоритмів управління до особливостей конкретної установки індукційного наплавлення, номенклатури деталі та складу шихти (композиційного матеріалу), а також завдання підтримки ухвалення ефективних рішень при відхиленні від нормального протікання процесу.

Метою даної роботи є дослідження властивостей технологічного процесу індукційного нагрівання деталей та нанесення КП, а також математичної моделі процесу індукційного нагрівання.

Процес індукційного наплавлення 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.

Процес індукційного нагрівання матеріалу деталі СВЧ описується в загальному випадку взаємозалежною системою рівнянь Максвелла і Фур'є для електричного і теплового [1,3] 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:

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

б) у типових ситуаціях, що характеризуються великою величиною відношення довжини нагрівача до діаметра заготовки, впливом крайових ефектів можна знехтувати;

в) при досить великій потужності, яка виділяється 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 заготовки радіусом R може бути представлений неоднорідним диференціальним рівнянням теплопровідності Фур'є, що у циліндричних координатах приймає вид

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

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, яка нагрівається, по координатах.

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

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 $a = \frac{\lambda}{\gamma c}$ – коефіцієнт теплопровідності.

В ряді робіт [1–3,5], 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, що гріють, по об'єму виробу.

У „гарячій” зоні нагрівання, заготовки, що нагріваються, втрачають феромагнітні властивості, 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 [1,4,5].

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

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

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

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 .

Висновки

Найбільш раціональним шляхом підвищення продуктивності процесу індукційного наплавлення та якості деталей, зміцнених КП є застосування автоматизованої системи, що дозволить виключити вплив «людського чинника» на результат технологічного процесу нанесення КП, а також оптимізувати його за заданим критерієм. Запропонована математична модель індукційного нагрівання теплотехнічно тонкого тіла з урахуванням особливостей вимог до індукційного наплавлення КП надає змогу розробити алгоритми керування для АСУ технологічним процесом нанесення зміцнюючих композиційних покриттів.

Список літератури

1. Зимин Л.С. Модели и методы оптимального управления и проектирования систем индукционного нагрева / Зимин Л.С., Казаков А.А., Сабуров в.В., Данилушкин А.И., Лившиц М.Ю., Самохвалова Л.Ф. // Сб. мат. Всесоюзной конф. «Теория и методы математического моделирования». – М.: Наука, 1978.
2. Казаков А.А., Разработка и исследование алгоритмов и систем оптимального управления индукционным нагревом металла: Автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – Куйбышев, 1975.
3. Кривочуров Н.Т. Способы контроля тепловложения при индукционной наплавке/ Кривочуров Н.Т., Иванайский В.В., Иванайский Е.А., Деризин В.Я. //Вестник Алтайского государственного аграрного университета.– Вып. 14.– Механизация и электрификация сельского хозяйства.– Барнаул, 2007. - С. 61-62.
4. 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.– Вып. 37.– Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. –Т. 2. – Харків, 2005.– С.174–178
5. 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.

Л. Вихрова, В. Бісюк, Е. Босов

Математические основы процесса индукционного нагрева деталей машин и наплавки композиционных покрытий

Приведены результаты анализа исследований систем и принципов управления технологическим процессом индукционной наплавки защитных композиционных покрытий, рассмотрена задача обеспечения независимости качества процесса нанесения КП от влияния внешних факторов, а также проблема автоматизации технологического процесса индукционной наплавки, предложена математическая модель для процесса индукционного нагрева теплотехнически тонкого тела.

L. Vihrova, V. Bisuk, E. Bosov

Mathematical foundations of the process of induction heating machine parts and deposition of composite coatings

Results of the analysis of research systems and the principles of process control the induction of protective surfacing composite coatings, considered the problem of ensuring the independence of the quality of the coating process manual of the influence of external factors, as well as to automate the process of induction welding process, mathematical model for the process of induction heating of heat-thin body.

Одержано 14.12.09

