

Автоматичне управління температурою та тривалістю індукційного нагрівання при наплавленні композиційних покриттів на деталі машин

Наведено результати аналізу факторів, що впливають на якість індукційного наплавлення композиційних покриттів, запропоновано методи управління параметрами процесу індукційного наплавлення, наведено рівняння, що визначають залежність температури наплавлення від параметрів процесу.

композиційне покриття, композиційний матеріал, індукційне наплавлення, автоматична система управління, оптимізація параметрів процесу, керування температурою наплавлення

Вступ. Одним з найбільш поширених сучасних методів підвищення експлуатаційних якостей деталей машин, що підлягають інтенсивному зношуванню є нанесення композиційних покриттів (КП) різними способами з використанням концентрованих потоків енергії. Серед них найефективнішими є лазерне, плазмове та індукційне наплавлення. Кожний має ряд переваг та недоліків за певних виробничих умов. Залежно від способу нанесення КП змінюються фактори, які впливають на якість нанесених покриттів, енергоємність та продуктивність процесу. Автоматичні системи управління (АСУ) процесами нанесення КП зазначеними способами суттєво відрізняються через певні технічні особливості процесів. Вони описуються різними структурними схемами і управляються за певними алгоритмами, але при розробці сучасних АСУ в повному обсязі не враховується сукупність впливових факторів та особливостей управління ними в процесі наплавлення КП.

Деякі особливості керування процесом індукційного наплавлення КП розглянуто в роботі [1].

Метою даної роботи є аналіз факторів, що суттєво впливають на якість покриттів, отриманих індукційним способом, а також проблем управління процесом нанесення КП.

Аналіз факторів, що впливають на якість індукційного наплавлення композиційних покриттів. В основі методу індукційного наплавлення 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, ВЧИ і ВЧГ.

При проходженні струму високої частоти (більше 70 кГц) через контур індуктора в поверхневих шарах основного металу наводяться індукційні електричні струми (струми Фуко), і зовнішній шар металу при цьому швидко нагрівається. Щільність таких струмів залежить від геометричних розмірів деталі, питомого опору, магнітної проникності матеріалу деталі та частоти струму. Шар порошкоподібної

шихти у зв'язку з високим електричним опором слабо реагує на дію змінного магнітного поля. Шихта нагрівається за рахунок теплопередачі від поверхні основного металу. Тому для забезпечення процесу наплавлення температура нагрівання поверхні основного металу повинна бути на 150..170 °С вища за температуру плавлення порошку твердого сплаву, а швидкість підведення тепла повинна бути значно більшою від швидкості його відведення в глиб виробу і втрат в навколишнє середовище.

Щільність індукційного струму в перерізі деталі нерівномірна; вона досягає найбільшого значення у поверхні і різко спадає за глибиною деталі. Розрахунок приведений в роботі [2] показує, що товщина шару δ , у якому поглинається майже вся передана теплова енергія (близько 86,5%), дорівнює:

$$\delta = 5,03 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (1)$$

де ρ - питомий електричний опір;

μ - відносна магнітна проникність;

f - частота струму.

З наведеної формули випливає, що із збільшенням частоти струму зменшується товщина шару δ , тобто тепло концентрується ближче до поверхні, чим зменшується час нагрівання поверхневих шарів.

При нагріванні вище критичної точки 768 °С (точка Кюрі) магнітна проникність сталі та чавуну стрибкоподібно зменшується, що обумовлює збільшення глибини проникнення струму і, отже, до різкого зниження інтенсивності нагрівання.

У деяких випадках через конструктивні особливості генератора СВЧ сила струму та частота індукційного наплавлення є сталими величинами в силу конструктивних особливостей генератора (СВЧ), тому в якості керуючого впливу можна взяти напругу і тривалість, управління здійснюється виконавчим елементом системи, тобто регулятором напруги з цифровим або аналоговим управлінням.

Потужність, яка передається на деталь при цьому залежить від характеристик її матеріалу, розмірів індуктора і параметрів електричного режиму [2]:

$$P_a = \frac{U_{in}^2 S \sqrt{\rho \mu}}{32 \pi^3 a^2 l_{in}^2 \sqrt{f^3}}, \quad (2)$$

де a - відстань (зазор) між індуктором і деталлю;

l_{in} - довжина індуктора;

U_{in} - напруга на клеммах індуктора;

S - площа поверхні деталі.

Деформація деталі при нагріванні, та процес плавлення шихти викликають зміну зазору між деталлю і індуктором, а також перерозподіл потужності в процесі нагрівання.

Якість наплавлених КП передусім залежить від розподілу температури в межах ділянки деталі, що підлягає наплавленню. Температура КП в процесі наплавлення безпосередньо залежить від потужності підведеної до індуктора з генератора струму високої частоти (СВЧ). Від підведеної потужності залежить тривалість нагрівання до повного розплавлення всієї шихти τ_e (утримання в індукторі при ввімкненому нагріванні всієї ділянки деталі, що підлягає наплавленню) та степінь перегрівання φ :

$$\varphi = \frac{\tau_e - \tau_k}{\tau_e} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де τ_k - тривалість нагрівання до розплаву шихти на певній ділянці поверхні що підлягає наплавленню.

Аналіз результатів індукційного наплавлення різних видів деталей СГТ у виробничих умовах показав, що на продуктивність і якість технологічного процесу наплавлення переважно впливають наступні фактори:

- відхилення розмірів заготовок деталей від заданих;
- порушення стабільності заготовок відносно індуктора під час наплавлення;
- термічні деформації деталі в процесі наплавлення;
- нерівномірність товщини шару шихти та коливання її хімічного складу;
- зміна підведеної до індуктора потужності;
- недостатня або надмірна тривалість наплавлення.

Відхилення розмірів і стабільність заготовок вирішується певними технологічними прийомами. Способи приготування і нанесення шихти, які дозволяють керувати хімічним та гранулометричним складом і товщиною шару композиційного матеріалу (КМ) розглянуто в роботі [3].

Збільшення швидкості наплавлення підвищує продуктивність системи, але процес наплавлення відбувається при більш високій температурі, ніж при «м'яких» режимах. Тобто можливе перегрівання ділянок, де плавлення шихти закінчується раніше і спостерігається більша температурна деформація деталі.

Першими в шихті плавляться флюси при температурі 600...750 °С. Розплавлені флюси підвищують швидкість передачі тепла часткам твердого сплаву, які, починаючи від поверхні деталі, плавляться при нагріванні до своєї точки солідусу. Після розплавлення шихти на одній ділянці (τ_k) продовжується її нагрівання при постійній підведеній потужності, яка передається на індуктор, до розплавлення шихти на всій поверхні (τ_e). Тоді температура на першій ділянці значно перевищить температуру ліквідусу сплаву. Це приводить до різкого збільшення швидкості розчинення основного металу в розплаві, що є основною причиною недостатньої зносостійкості евтектичної зони напавленого КП. Якщо температура нагрівання наближається до точки солідусу матеріалу, спостерігається міжкристалічне проникнення наплавляемого твердого сплаву, і пограничні об'єми сталі переходять в стан рідини (4-й ступінь сплавлення). При цьому зростає крихкість напавленої ділянки, ударна в'язкість знижується в 10..15 разів і не відновлюється термічною обробкою.

Для того щоб вирівняти нагрівання окремих ділянок деталі і не доводити його до критичних температур потрібно, після досягнення температури плавлення КМ оброблюваної поверхні деталі, розміщеної в полі індуктора, змінити підведену потужність і задати такий проміжок часу, протягом якого потужність, що передається на індуктор забезпечить тільки компенсацію тепловитрат. Процес нагрівання зазначеної ділянки призупиниться на досягнутому рівні, а за рахунок теплопередачі відбудеться вирівнювання температури на поверхні наплавлення КП.

Перегрівання деталі при індукційному напавленні можна уникнути, якщо зменшити інтенсивність нагрівання в кінці процесу і перетримати деталь протягом певного часу в індукторі. Для управління зазначеним процесом і отримання стабільної якості напавленого КП, зменшення термічної деформації деталі, підведення до індуктора необхідної потужності, а також тривалістю нагрівання доцільно використовувати автоматичну систему управління (АСУ).

Управління параметрами процесу індукційного наплавлення. Для того щоб обрати принцип розробки АСУ і оптимізувати процес наплавлення по визначним параметрам необхідно врахувати специфіку відомих способів автоматичного управління режимами наплавлення СВЧ [4,5]:

а) нагрівання при постійній анодній напрузі на генераторі. При цій умові струм в індукторі і напруга на ньому будуть визначатися фізичними властивостями матеріалів,

що наплавляються. Якщо вони суттєво не змінюються в процесі нагрівання деталей, то при постійній напрузі генератора і тривалості нагрівання результати процесу наплавлення будуть практично однакові. Для забезпечення однакового терміну нагрівання в електричну схему вводять реле часу, яке після закінчення заданої тривалості процесу вимикає установку наплавлення. Корегування режиму нагрівання здійснюється зміною установок реле часу або зміною напруги генератора;

б) нагрівання при постійній напрузі на індукторі. При необхідності більш точно багаторазово відтворити режим нагрівання система регулювання напруги генератора виконується таким чином, щоб підтримувати постійну напругу на індукторі. Тривалість процесу наплавлення забезпечується також реле часу;

в) застосовується реле енергії. В цьому випадку закінчення процесу наплавлення виконується по сигналу реле енергії, яке з моменту вмикання нагрівання фіксує енергію, передану в деталь під час наплавлення КП;

г) контроль температури наплавлення пірометром. В цьому випадку нагрівання при постійній напрузі зупиняють по сигналу пірометра, який безперервно вимірює температуру певної ділянки поверхні деталі в процесі наплавлення. Швидкодіючі сучасні пірометри вимірюють температуру поверхні постійно порівнюючи її з еталоном. Такий метод дозволяє вимірювати температуру достатньо точно. Крім того, при постійному вимірюванні температури на поверхні деталі система управління може компенсувати можливі відхилення параметрів процесу наплавлення;

д) управління процесом наплавлення КП за допомогою програмованої системи управління.

Аналіз зазначених способів управління технологічним процесом індукційного наплавлення дав можливість запропонувати спосіб автоматизації керування температурою індукційного наплавлення композиційного покриття [6], який поєднує в собі переваги 4-го та 5-го способів. Для реалізації запропонованого способу розроблено функціональну схему АСУ та алгоритм управління системою [7].

Процес індукційного наплавлення КП включає нагрівання деталей струмом високої частоти (СВЧ), що характеризується складними взаємодіями електромагнітних і теплофізичних параметрів системи «індуктор-деталь» з температурою матеріалу деталі зміною їх за часом і по об'єму деталі. Це визначає відповідний підхід до індукційного нагрівача як об'єкта автоматичного регулювання з розподіленими параметрами.

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

З урахуванням прийнятих допущень процес індукційного нагрівання деталі на глибину h може бути описано неоднорідним диференціальним рівнянням теплопровідності Фур'є:

$$\rho_n c(T) \frac{dT}{dt} = \lambda(T) \left[\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} \right] + W(h, T, P), \quad (4)$$

де x, y - координати локальних ділянок поверхні деталі;

ρ_n - густина матеріалу поверхневого шару деталі;

P - потужність джерел тепловиділення;

λ_y, λ_x - коефіцієнти теплопровідності, що враховують анізотропність властивості деталі по координатах;

T - температура виробу ;

$\lambda(T), c(T), \rho(T)$ – теплопровідність, теплоємність та питомий опір матеріалу деталі;

h - глибина прогрівання деталі;

$W(h, T, P)$ - функція розподілу внутрішніх джерел тепла.

Як було зазначено, специфічна особливість процесу індукційного нагрівання металу є нерівномірний розподіл потужності внутрішніх джерел тепловиділення по об'єму виробу, 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 $\lambda(T)$, $c(T)$, $\rho(T)$ також 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:

$$\frac{dT}{dt} = a \left[\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} \right] + \frac{W(x, y, P)}{\rho_n c}, \quad (5)$$

де $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ - коефіцієнт 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 проникливість від шару до шару різко змінюється, приводячи до невизначеності закону розподілу потужності джерел, що гріють, по об'єму виробу.

У „гарячій” зоні нагрівання заготовки 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.

Прийнята апроксимація дозволяє виключити нелінійну залежність функції розподілу джерел тепла від температури, замінивши її відомою функцією від просторової координати. Тобто, розв'язок наведених рівнянь дасть можливість визначити оптимальні температуру, тривалість, напругу і потужність індукційного наплавлення, необхідні для якісного нанесення КП в умовах виробництва.

Висновки. Аналіз сукупності факторів, що впливають на якість процесу індукційного наплавлення покриттів та їх управління дає можливість зазначити наступне:

- щоб запобігти термічній деформації деталі необхідно починати процес наплавлення з відносно низькою напругою на клемах індуктору;
- підвищення напруги повинно відбуватись поступово, а при нагріванні поверхні деталі до точки ліквідусу шихти, зупинитись на досягнутому рівні впродовж заданого проміжку;

- використання запропонованого способу керування температурою індукційного наплавлення КМ забезпечить високу точність дотримання заданого режиму роботи установки і дозволить достатньо швидко змінювати зазначені параметри при зміні номенклатури деталей або складу шихти.

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. Деклараційний патент на винахід України № 8907. 7G01G11/00. Спосіб багатоконпонентного дозування сипкого матеріалу/ Аулін В.В, Віхрова Л.Г., Бісюк В.А., Бобрицький В.М.; заявник та патентовласник Кіровоградський нац. тех. університет, заявлено 28.03.05., зареєстровано 15.08.2005. Бюл. №8.
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.

Приведены результаты анализа факторов, которые влияют на качество индукционной наплавки композиционных покрытий, предложены методы управления параметрами процесса индукционной наплавки, приведены уравнения, которые определяют зависимость температуры наплавки от параметров процесса.

The results of analysis of factors which influence on quality induction smelting of composition coverages are resulted, the methods of management the parameters of process of induction smelting are offered, equalizations which determine dependence of temperature of smelting from the parameters of process are resulted.