

УДК 621.793

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТЕРМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ПРИПЕКАНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНУТРЕННЕГО ИНДУКТОРА ТОКА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

канд. техн. наук Л.П. КАШИЦИН, И.А. СОСНОВСКИЙ
(Институт механики и надёжности машин НАН Беларуси, Минск),
канд. техн. наук Ю.Н. ГАФО

(Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт сварки
и защитных покрытий с опытным производством, Минск)

Разработан инженерный метод расчета термических режимов центробежного припекания с использованием внутреннего индуктора тока высокой частоты, учитывающий геометрические, теплофизические и электрофизические параметры детали и порошкового слоя, влияние совместного действия конвективного и лучистого теплообмена на поверхности детали.

Введение. Одним из наиболее производительных методов нанесения порошковых покрытий является процесс индукционного центробежного припекания [1]. Индукционным центробежным припеканием в настоящее время можно наносить покрытия на внутренние, наружные и торцевые поверхности. Среди разнообразия схем индукционного нагрева в последнее время все более широкое применение в технологии центробежного припекания находит нагрев токами высокой частоты (ТВЧ) со стороны внутренней поверхности детали (рис. 1).

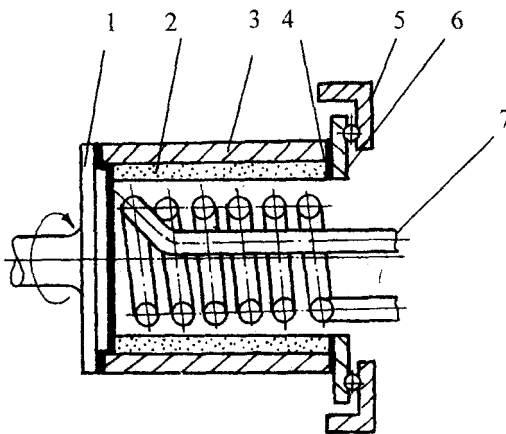


Рис. 1. Принципиальная схема центробежного припекания покрытий из металлических порошков с использованием внутреннего индуктора ТВЧ:

1 - шпиндель биметаллизирующей установки; 2 - наносимый порошковый материал;
3 - деталь; 4 - прокладки; 5 - опора; 6 - опорный диск; 7 - индуктор

Такому виду нагрева ТВЧ присущи следующие основные преимущества:

- высокая производительность;
- низкая энергоёмкость процесса;
- минимальная зона термического влияния индукционного тока на деталь и др.

Известные методы решения тепловых задач для процессов индукционных припекания и наплавки порошковых покрытий [2 - 4] обладают следующими основными недостатками:

- не учитывается наличие радиационного теплообмена с поверхностью заготовки, что существенно снижает точность расчетов;
- применявшиеся для решения этих задач операционные методы и метод конечных интервалов приводят к чрезвычайно громоздким математическим выражениям, требующим для расчета использования вычислительной техники, и не пригодны для инженерной практики;
- отсутствуют основанные на известных решениях рекомендации по оптимизации технологических процессов.

Основные предположения и допущения. Анализ основных особенностей технологии центробежного индукционного припекания (ЦИП) позволяет сделать вывод, что наиболее важной стадией технологического процесса, определяющей физико-механические и эксплуатационные свойства получае-

мых двухслойных изделий, является изотермическая выдержка при температуре спекания порошкового материала. Основная техническая задача на этой стадии - поддержание заданной средней температуры порошкового слоя (температуры спекания) в течение определенного промежутка времени (времени спекания). При этом термические режимы на предыдущих стадиях нагрева не оказывают существенного влияния на кинетику процесса припекания порошкового слоя к подложке.

Толщина порошкового слоя, как правило, значительно меньше толщины подложки и радиуса кривизны его поверхности. Свободную внутреннюю поверхность порошкового слоя и торцы двухслойного цилиндра можно считать теплоизолированными.

Следовательно, термическим сопротивлением порошкового слоя можно пренебречь, а распределение температуры по ее толщине считать однородным и равным температуре внутренней поверхности подложки. При этом, начиная с определенного значения критерия Фурье ($F_0 \approx 0,305$), наступает квазистационарный режим теплопроводности, когда распределение температуры в подложке не изменяется по форме, но температура в каждой точке растет во времени с постоянной относительной скоростью. По достижении внутренней поверхностью цилиндрической заготовки температуры спекания порошкового материала температура этой поверхности поддерживают постоянной путем управления мощностью источника нагрева (генератора токов высокой частоты). При этом распределение температуры по толщине заготовки является стационарным, а мощность, выделяемая внутренними источниками, равна тепловому потоку с наружной поверхности заготовки, который обусловлен конвективным и лучистым теплообменом с окружающей средой.

Осуществление контроля и регулирования температуры внутренней поверхности вращающейся заготовки или порошкового слоя в технологическом процессе центробежного индукционного припекания является технически сложной задачей, рациональное решение которой возможно только при экспериментальных исследованиях. Поэтому на практике, как правило, используется контроль температуры наружной поверхности бесконтактными пирометрическими методами. Таким образом, для поддержания заданной температуры порошкового слоя на стадии режима припекания требуется определить температурный перепад по толщине заготовки путем решения стационарной задачи теплопроводности для полого цилиндра с внутренним источником тепла. При этом зависимостью теплопроводности от температуры можно пренебречь, так как на практике толщина стенки цилиндра существенно меньше его диаметра и перепад температуры относительно мал (меньше 1 К).

Математическая формулировка и решение стационарной задачи теплопроводности. Исходя из вышеприведенного анализа основных особенностей технологии ЦИП и сделанных допущений, стационарную задачу теплопроводности на стадии припекания порошкового слоя к внутренней поверхности полой цилиндрической заготовки можно сформулировать следующим образом. Одномерное температурное поле в заготовке описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{\lambda}{R} \frac{d}{dR} \left(R \frac{dT}{dR} \right) + q_v = 0, \tag{1}$$

где T – температура, К; R – радиальная координата, м; q_v – удельная мощность внутренних источников теплоты, Вт/м³; λ – коэффициент теплопроводности материала заготовки при температуре спекания порошка (T_{cn}), Вт/(м·К).

Пусть на внутренней поверхности цилиндра ($\lambda = \lambda_1$) теплообмен отсутствует, а на наружной поверхности ($R = R_2$) поддерживается температура $T = T_2$. Тогда граничные условия имеют вид:

$$\left. \frac{dT}{dR} \right|_{R=R_1} = 0; \tag{2}$$

$$T|_{R=R_2} = T_2. \tag{3}$$

Учитывая (2) и (3), после первого интегрирования уравнения (1) получим

$$\lambda \frac{dT}{dR} = -\frac{1}{R} \int_{R_1}^R q_v \cdot \rho d\rho, \tag{4}$$

а после второго интегрирования имеем

$$T - T_2 = \frac{1}{\lambda} \int_R^{R_2} \frac{dr}{r} \int_{R_1}^r q_v \cdot \rho d\rho. \tag{5}$$

Из теории индукционного нагрева известно [5], что мощность тепловых источников, выделяемая в элементарном слое толщиной dx на глубине x , определяется из соотношения:

$$dR = \frac{1}{2} S \rho_3 \delta_{me}^2 e^{-2x/\Delta} dx, \quad (6)$$

где $\Delta \approx 503 \sqrt{\rho_3 / \mu f}$; S – площадь поверхности проводящей среды, m^2 ; ρ_3 – удельное электрическое сопротивление, Ом/м; δ_{me} – плотность тока в слое толщиной dx . При этом если деталь имеет не плоскую, а цилиндрическую форму, это практически не сказывается на точности расчетов.

Исходя из этого, выражение для удельной мощности внутренних тепловых источников можно записать в виде:

$$q_v = q_0 e^{-\frac{2(R-R_1)}{\Delta}}, \quad (8)$$

где

$$q_0 = \frac{1}{2} \rho_3 \delta_{me}^2. \quad (9)$$

Подставив выражение (8) в решение (5), получим

$$T - T_2 = \frac{q_0}{\lambda} e^{-\frac{2R_1}{\Delta}} \int_R^{R_2} \frac{dr}{r} \int_{R_1}^r e^{-\frac{2\rho}{\Delta}} \rho d\rho, \quad (10)$$

Учитывая, что [6]

$$\int e^{ax} x dx = e^{ax} \left[\frac{x}{a} - \frac{1}{a^2} \right], \quad (11)$$

получим

$$\int_{R_1}^r e^{-\frac{2\rho}{\Delta}} \rho d\rho = -\frac{\Delta}{R} \left[e^{-\frac{2r}{\Delta}} \left(r + \frac{\Delta}{2} \right) - e^{-\frac{2R_1}{\Delta}} \left(R_1 + \frac{\Delta}{2} \right) \right]. \quad (12)$$

Поскольку в реальных технологических процессах $R_1 \gg \frac{\Delta}{2}$ и, следовательно, $r \gg \frac{\Delta}{2}$, формулу (12) можно упростить:

$$\int_{R_1}^r e^{-\frac{2\rho}{\Delta}} \rho d\rho \approx -\frac{\Delta}{2} \left(r e^{-\frac{2r}{\Delta}} - R_1 e^{-\frac{2R_1}{\Delta}} \right). \quad (13)$$

Тогда после подстановки (13) в (10) и интегрирования окончательно получим формулу для определения температуры заготовки на расстоянии R от центра:

$$T(R) - T_2 = \frac{q_0}{\lambda} e^{-\frac{2R_1}{\Delta}} \left(-\frac{\Delta}{2} \right) \left[\int_R^{R_2} e^{-\frac{2r}{\Delta}} dr - R_1 e^{-\frac{2R_1}{\Delta}} \int_R^{R_2} \frac{r}{R} dr \right] = \frac{q_0 \Delta}{2\lambda} \left\{ \frac{\Delta}{2} \left[e^{-\frac{2(R_2-R_1)}{\Delta}} - e^{-\frac{2(R-R_1)}{\Delta}} \right] + R_1 \ln \frac{R_2}{R} \right\}. \quad (14)$$

Подставив в (14) $R = R_1$, получим соотношение для расчета температуры на наружной поверхности заготовки T_2 , необходимой для поддержания на внутренней поверхности заготовки заданной температуры T_1 , равной температуре спекания порошка T_{cn} :

$$T_2 = T_1 - \frac{q_0 \Delta}{2\lambda} \left\{ R_1 \ln \frac{R_2}{R_1} - \frac{\Delta}{2} \left[1 - e^{-\frac{2(R_2-R_1)}{\Delta}} \right] \right\}, \quad (15)$$

Вместе с тем формула (15) не пригодна для использования на практике, поскольку в ней не определена величина q_0 , зависящая, кроме всего прочего, от условий теплообмена на наружной поверхности заготовки.

Если учесть отсутствие теплообмена на внутренней поверхности заготовки, то плотность теплового потока с наружной поверхности заготовки в результате совместного конвективного и лучистого теплообмена

$$-\lambda \frac{dT}{dR} \Big|_{R=R_2} = \alpha(T_2 - T_0) + \varepsilon \sigma T^4 \quad (16)$$

равна плотности теплового потока изнутри заготовки на этой поверхности, определяемой из формулы (4):

$$-\lambda \frac{dT}{dR} \Big|_{R=R_2} = \frac{1}{R_2} \int_{R_1}^{R_2} q_v \rho d\rho = \frac{q_0}{R_2} e^{\frac{2R_1}{\Delta}} \left(-\frac{\Delta}{2} \right) \left(R_2 e^{-\frac{2R_2}{\Delta}} - R_1 e^{-\frac{2R_1}{\Delta}} \right) =$$

$$= -\frac{\Delta}{2} q_0 \left[e^{-\frac{2(R_2-R_1)}{\Delta}} - \frac{R_1}{R_2} \right]. \tag{17}$$

Здесь T_0 – температура окружающей среды, К; α – коэффициент конвективного теплообмена; σ – постоянная излучения абсолютного черного тела; ε – степень черноты наружной поверхности заготовки.

Подставив формулы (8) и (13) в выражение (17) и приравняв правые части (16) и (17), получим соотношение для определения q_0 :

$$q_0 = \frac{2}{\Delta} \cdot \frac{\alpha(T_2 - T_0) + \varepsilon\sigma T_2^4}{\frac{R_1}{R_2} - e^{-\frac{2(R_2-R_1)}{\Delta}}}. \tag{18}$$

Тогда из выражения (15) с учетом (18) получим соотношение, связывающее температуры внутренней и наружной поверхностей заготовки в процессе припекания порошкового слоя:

$$T_1 = T_2 - \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\alpha(T_2 - T_0) + \varepsilon\sigma T_2^4}{\frac{R_1}{R_2} - e^{-\frac{2(R_2-R_1)}{\Delta}}} \left\{ R_1 \ln \frac{R_2}{R_1} - \frac{\Delta}{2} \left[1 - e^{-\frac{2(R_2-R_1)}{\Delta}} \right] \right\}. \tag{19}$$

Формула (19) представляет алгебраическое уравнение четвертой степени относительно T_2 для заданных значений T_1 . Точное решение его можно найти известными методами, например, методом Декарта – Эйлера [7].

Величину α можно рассчитать, воспользовавшись эмпирической формулой для теплоотдачи вращающегося в воздухе цилиндра, учитывающей влияние естественной конвекции и вращения [8]:

$$Nu = 0,095(2Re^2 + Gr)^{0,35}, \tag{20}$$

Здесь

$$Nu = \frac{\alpha R_2}{\lambda_a} - \text{число Нуссельта}, \tag{21}$$

$$Re = \frac{R_2^2 \omega}{\nu} - \text{число Рейнольдса}, \tag{22}$$

$$Gr = \frac{8\beta g \theta R_2^3}{\nu^2} - \text{число Грасгофа}, \tag{23}$$

где λ_a – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м·град; ω – угловая скорость вращения, с⁻¹; ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с; β – коэффициент объемного расширения воздуха, град⁻¹; g – ускорение свободного падения, м/с²; θ – температурный напор, равный абсолютной величине разности между температурами воздуха T_a и наружной поверхностью цилиндра T_2 , град (значения λ_a и ν определяются для температуры $T_m = \frac{T_2 + T_a}{2}$).

Анализ формулы (20) показывает, что при больших скоростях вращения ($Re > 10^4$) влиянием естественной конвекции можно пренебречь.

Расчет распределения температуры. Расчет распределения температуры по толщине стенки на стационарной стадии индукционного нагрева с использованием формул (15), (18) и (20) показал, что при частотах более 66 кГц в диапазонах размеров $R_1 = 50...150$ мм, $R_2 = 55...180$ мм, скоростей вращения 52...262 с⁻¹ и температур $T_2 = 1323...1473$ К перепад температуры по толщине стенки не превышает 11 К. Наиболее существенный перепад наблюдается в области малых частот индукционного нагрева (2,4...8 кГц). Сопоставление результатов теоретических, расчетных и экспериментальных данных, полученных при исследовании процесса центростремительного индукционного припекания покрытия из порошка самофлюсующегося Fe – Cr – В – Si-сплава ПР-Х4Г2Р4С2Ф на внутреннюю поверхность втулки из стали 20 (рис. 2), показало, что погрешность расчета падения температуры $\Delta T = T_2 - T$ с увеличением относительной координаты $\xi = \frac{R_2 - R}{R_2 - R_1}$ не превышает 5 %.

Таким образом, из результатов выполненных исследований следует, что при нагреве генераторами тока высокой частоты со стандартными частотами 66, 440 кГц и выше на практике в процессе припекания на внутреннюю поверхность втулки порошкового слоя температуру ее наружной поверхности необходимо поддерживать на уровне заданной температуры спекания порошка T_S . При нагреве со стандартными частотами 8 кГц и ниже значение температуры наружной поверхности втулки следует поддерживать равным по величине, вычисляемой по формулам (19) и (20), принимая $T_1 = T_S$.

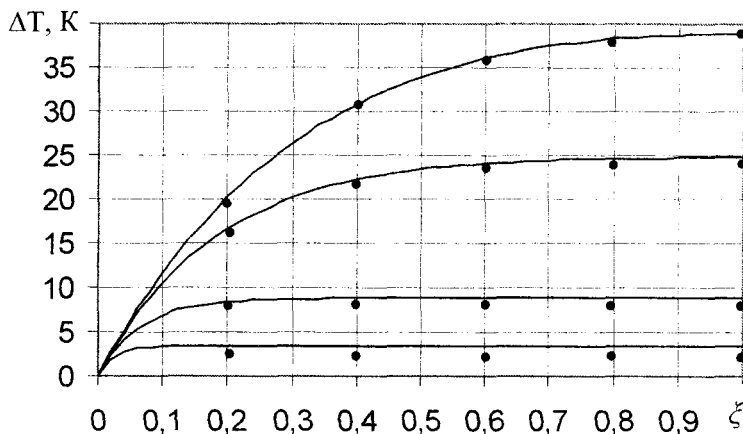


Рис. 2. Распределение температуры по толщине стенки при индукционном припекании порошка Fe-Cr-B-Si-сплава на внутреннюю поверхность стальной втулки ($R_1 = 80$ мм, $R_2 = 95$ мм, $T_2 = 1373$ К, $\omega = 157$ с⁻¹) для различных частот индукционного нагрева: 1 – 2,4; 2 – 8; 3 – 66; 4 – 440 кГц (сплошные линии – теоретический расчет, точки – экспериментальные данные)

Выводы. В результате анализа технологических особенностей процесса индукционного центробежного припекания порошковых покрытий на внутренние поверхности полых цилиндрических заготовок при нагреве наружным индуктором тока высокой частоты показано, что наиболее рациональным является поддержание заданной температуры спекания порошка путем пирометрического контроля температуры наружной поверхности заготовки и регулирования мощности нагрева.

Получены достаточно простые алгебраические формулы для расчета температуры порошкового слоя по результатам измерения температуры наружной поверхности заготовки. Формулы учитывают влияние совместного конвективно-лучистого теплообмена, теплофизические и электрофизические свойства материала заготовки, ее геометрические размеры, скорость вращения и частоту используемого генератора токов высокой частоты.

Теоретически и экспериментально установлено, что при стандартных частотах 66 кГц и выше в практически важных случаях температура наружной поверхности заготовки превышает температуру порошка не более, чем на 22 К, а погрешность расчета по полученным формулам не превышает 4 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Центробежное припекание порошковых покрытий при переменных силовых воздействиях / Н.Н. Дорожкин, Л.П. Кашицин, Т.М. Абрамович, И.А. Кирпиченко; Под ред. В.Г. Горобцова. - Мн.: Наука і тэхніка, 1993. - 159 с.
2. Дорожкин Н.Н., Абрамович Т.М., Жорник В.И. Получение покрытий методом припекания. - Мн: Наука и техника, 1980. - 176 с.
3. Дорожкин Н.Н., Кот В.А., Кашицин Л.П. Рекомендации по выбору технологических параметров индукционного припекания и наплавки. - Мн: ИНДМАШ АН БССР, 1982. - 60 с.
4. Введение в физику твердых, жидких и пористых систем / Н.Н. Дорожкин, А.И. Жорник, В.А. Жорник и др. Ч. II; Под ред. Н.Н. Дорожкина. - Таганрог: Изд-во Таганрогского гос. пед. ин-та, 2001. - 135 с.
5. Слухоцкий А.Е., Рыский С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. - Л.: Энергия, 1974. - 264 с.
6. Dwight H.B. Tables of integrals and other mathematical data. -New York: The Macmillan Company, 1961.
7. Korn G.A., Korn T.M. Mathematical handbook for scientists and engineers. Definitions, theorems and formulas for reference and review. -New-York, Toronto, London: Me GRAW-HILL BOOK COMPANY INC, 1961.
8. Dropkin D., Karmi A. Natural - convention heat transfer from a horizontal cylinder rotating in air // Trans, ASME.- 1957. -V. 79, №4.