

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ МНОГОСЛОЙНЫХ И ТОЛСТОСЛОЙНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Белявин К.Е.¹, Сосновский И.А.², Курилёнок А.А.², Худолей А.Л.²

1. Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь, e-mail: dz-m@tut.by

2. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, e-mail: sos3@tut.by

Целью настоящей работы являлась разработка теплофизической модели для определения термических режимов процесса центробежной индукционной наплавки толстослойных и многослойных порошковых покрытий.

Решение тепловой задачи. Рассмотрим процесс центробежной индукционной наплавки (ЦИН) толстослойного покрытия (рисунок 1). Толстослойным будем считать такое покрытие, в котором распределением температуры по его толщине при расчете параметров режима нагрева нельзя пренебрегать.

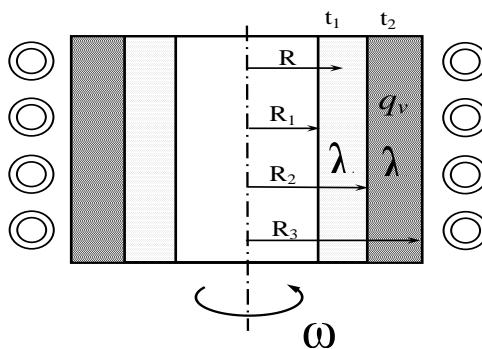


Рисунок 1 – Схема ЦИН толстослойных покрытий

Дифференциальное уравнение теплопроводности с учетом сделанных допущений запишется так:

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

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

Общее решение этого уравнения в том случае, когда внутренние источники теплоты зависят от координаты, имеет вид:

$$T = A \int \frac{dR}{R\lambda} + B - \int \frac{dR}{R\lambda} \int q_v R dR, \quad (2)$$

где A и B – постоянные интегрирования.

Перейдем к безразмерной координате \bar{R} с помощью замены переменной

$$\bar{R} = \frac{R}{R_3}, \quad (3)$$

где R_3 – радиус наружной поверхности заготовки. Тогда решение (2) с учетом того, что $\lambda = \text{const}$, можно записать в виде

$$T = \frac{A}{\lambda} \int \frac{d\bar{R}}{\bar{R}} + B - \frac{R_3^2}{\lambda} \int \frac{d\bar{R}}{\bar{R}} \int q_v \bar{R} d\bar{R}. \quad (4)$$

Учитывая, что материал заготовки – ферромагнитный, а наносимое покрытие – парамагнитное, исходя из (4) распределение температуры t_1 по толщине покрытия описывается выражением

$$t_1 = \frac{A_1}{\lambda_1} \int \frac{d\bar{R}}{\bar{R}} + B_1, \quad (5)$$

а распределение температуры t_2 по толщине заготовки – выражением

$$t_2 = \frac{A_2}{\lambda_2} \int \frac{d\bar{R}}{\bar{R}} + B_2 - \frac{R_3^2}{\lambda_2} \int \frac{d\bar{R}}{\bar{R}} \int q_v \bar{R} d\bar{R}, \quad (6)$$

где A_1, A_2, B_1 и B_2 – постоянные интегрирования; λ_1 – коэффициент теплопроводности материала покрытия; λ_2 – коэффициент теплопроводности материала заготовки.

Граничные условия на внешних поверхностях составной системы имеют вид

$$\left. \frac{dt_1}{d\bar{R}} \right|_{\bar{R}=\frac{R_1}{R_3}} = 0 \quad (7)$$

и

$$t_2|_{\bar{R}=1} = T_3, \quad (8)$$

где T_3 – температура наружной поверхности заготовки.

Условия сопряжения на границе раздела слоев имеют вид:

$$t_1|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}} = t_2|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}}, \quad (9)$$

и

$$\lambda_1 \left. \frac{dt_1}{d\bar{R}} \right|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}} = \lambda_2 \left. \frac{dt_2}{d\bar{R}} \right|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}}. \quad (10)$$

Подставив решения (5) и (6) в граничные условия (7) – (10), получим систему из четырех алгебраических уравнений с четырьмя неизвестными A_1, A_2, B_1 и B_2 :

$$\frac{A_1 R_3}{\lambda R_1} = 0; \quad (11)$$

$$B_2 - C|_{\bar{R}=1} = T_3; \quad (12)$$

$$\frac{A_2}{\lambda_2} \ln \frac{R_2}{R_3} + B_2 - C \Big|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}} = \frac{A_1}{\lambda_1} \ln \frac{R_2}{R_3} + B_1; \quad (13)$$

$$\frac{A_2}{\lambda_2} \ln \frac{R_3}{R_2} + B_2 - \frac{dC}{d\bar{R}} \Big|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}} = \frac{A_1}{\lambda} \frac{R_3}{R_2}, \quad (14)$$

где

$$C(\bar{R}) = \frac{R_3^2}{\lambda_2} \int \frac{d\bar{R}}{\bar{R}} \int q_v \bar{R} d\bar{R}. \quad (15)$$

Отсюда:

$$A_1 = 0; \quad (16)$$

$$A_2 = \lambda_2 \frac{R_2}{R_3} \frac{dC}{d\bar{R}} \Big|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}}; \quad (17)$$

$$B_2 = C|_{\bar{R}=1} + T_3; \quad (18)$$

$$B_1 = \frac{R_2}{R_3} \ln \frac{R_2}{R_3} \frac{dC}{d\bar{R}} \Big|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}} - C|_{\bar{R}=1} - T_3. \quad (19)$$

Таким образом, общее решение поставленной тепловой задачи для заготовки с толстослойным покрытием получается подстановкой формул (16) – (19) в уравнения (5) и (6) и имеет вид:

$$T_1 = \frac{R_2}{R_3} \ln \frac{R_2}{R_3} \frac{dC}{d\bar{R}} \Big|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}} - C|_{\bar{R}=1} - T_3; \quad T_2 = \frac{R_2}{R_3} \ln \bar{R} \frac{dC}{d\bar{R}} \Big|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}} - C + C|_{\bar{R}=1} + T_3. \quad (20)$$

Рассмотрим теперь процесс ЦИН многослойного покрытия (рисунок 2), используя при этом приведенный выше анализ ЦИН толстослойного покрытия.

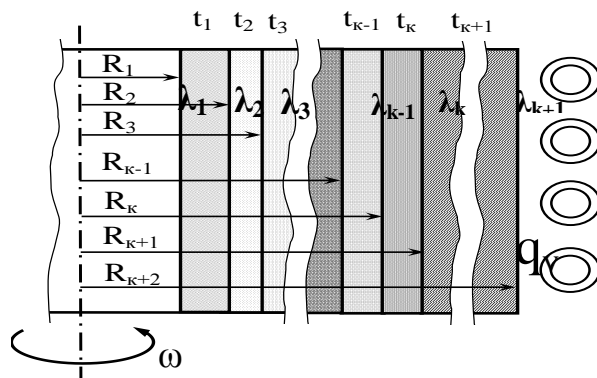


Рисунок 2 – Схема ЦИН многослойных покрытий.

Многослойное покрытие, состоящее из k слоев различной толщины и теплопроводности, можно рассматривать как однослойное покрытие толщиной $h=R_{k+1} - R_1$ из материала с некоторым эффективным коэффициентом теплопроводности $\lambda_{эфф}$. Тогда и в этом случае справедливы выводы, полученные ранее для ЦИН толстослойных покрытий. Т.е. термические режимы изотермической выдержки не будут зависеть от количества слоев, их толщины, теплопроводности используемых материалов, а для их расчета также можно пользоваться расчетными соотношениями для ЦИН тонкослойных покрытий.

Выводы

В результате анализа технологического процесса центробежной индукционной наплавки (ЦИН) толстослойных и многослойных порошковых покрытий на стадии изотермической выдержки в рамках разработанной теплофизической модели математически строго установлено следующее:

- температура наплавляемого порошкового слоя постоянна по его сечению и не зависит от толщины слоя и его теплопроводности;
- распределение температуры по сечению заготовки не зависит от толщины порошкового слоя и его теплопроводности;
- температура порошкового слоя равна температуре внутренней поверхности заготовки.

На основании проведенного анализа основных особенностей технологии ЦИН и сделанных допущений математически строго показано, что толщина порошкового слоя не оказывает влияния на выбор термических режимов изотермической выдержки в процессе ЦИН. Следовательно, для расчета термических режимов ЦИН толстослойных покрытий можно пользоваться расчетными соотношениями для ЦИН тонкослойных покрытий.

Термические режимы изотермической выдержки ЦИН многослойных покрытий не зависят от количества слоев, их толщин, теплопроводности используемых материалов, а для их расчета можно пользоваться расчетными соотношениями для ЦИН тонкослойных покрытий.