

УДК 621.793

¹ И. А. Сосновский, ² К. Е. Белявин, д-р техн. наук, проф.,
¹ М. А. Белоцерковский, д-р техн. наук, доцент, ¹ А. А. Курилёнок, канд. техн. наук
¹ Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, РБ,
Тел.: 284-15-42, факс: 284-08-90, E-mail: sos3@tut.by;
² Белорусский национальный технический университет, Минск, РБ,
Тел.: 293-95-18, факс: 296-67-85, E-mail: dz-m@tut.by

ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ ТЕРМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ МНОГОСЛОЙНЫХ И ТОЛСТОСЛОЙНЫХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Разработан инженерный метод расчета термических режимов центробежной индукционной наплавки (ЦИН) композиционных порошковых материалов для толстослойных и многослойных покрытий. В результате анализа технологического процесса ЦИН толстослойных и многослойных покрытий на стадии изотермической выдержки в рамках разработанной теплофизической модели математически строго установлено, что толщина порошкового слоя не оказывает влияния на выбор термических режимов изотермической выдержки в процессе ЦИН. 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.

Ключевые слова: центробежная индукционная наплавка, толстослойные покрытия, многослойные покрытия, температура, время.

I. A. Sosnovsky, K. E. Belyavin, M. A. Belotserkovsky, A. A. Kurilyonok

ENGINEERING CALCULATION OF THERMAL CONDITIONS OF THE PROCESS OF CENTRIFUGAL INDUCTION SURFACING OF MULTI-LAYER AND THICK-LAYER POWDER COATINGS

The engineering method for calculating the thermal regimes of centrifugal induction surfacing (CIS) of thick-layer and multi-layer powder coatings is developed. As a result of analysis of the CIS thick-layer and multi-layer coatings technological process under isothermal soaking within the developed thermophysical model is strictly mathematically determined that the thickness of the powder layer has no influence on the thermal regime of isothermal soaking the CIS. Thermal regimes of isothermal soaking of multilayer coatings CIS does not depend on the number of layers, their thicknesses, the thermal conductivity of the used materials, and for their calculation we can use the calculated ratios for CIS of thin-layer coatings.

Keywords: centrifugal induction surfacing, thick-layer coatings, multi-layer coatings, temperature, time.

1. Основные предположения и допущения

Анализ основных особенностей технологии центробежной индукционной наплавки (ЦИН) [1-4] для толстослойных и многослойных покрытий позволяет сделать вывод, что наиболее важной стадией технологического процесса, определяющей физико-механические и эксплуатационные свойства получаемых двухслойных изделий, является изотермическая выдержка при температуре плавления порошкового материала. Основная техническая задача на этой стадии – поддержание заданной средней температуры порошкового слоя (температуры плавления) в течение определенного промежутка времени (времени плавления). При этом термические режимы на предыдущих стадиях нагрева не оказывают существенного влияния на кинетику процесса наплавки порошкового слоя к подложке.

Свободную внутреннюю поверхность порошкового слоя и торцы двухслойного цилиндра можно считать теплоизолированными. Следовательно, термическим сопро-

© Сосновский И.А., Белявин К.Е., Белоцерковский М.А., Курилёнок А.А.; 2019

тивлением 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, 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 плавления порошкового материала температуру 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 ЦИН 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 плавления требуется определить температурный перепад по толщине заготовки путем решения стационарной задачи теплопроводности для полого цилиндра с наружным источником тепла. При этом, так как на практике толщина стенки цилиндра существенно меньше его диаметра и перепад температуры относительно мал (меньше 25 К), зависимостью теплопроводности от температуры можно пренебречь.

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

2. Решение тепловой задачи

Рассмотрим процесс ЦИН толстослойного покрытия (рис.1). Толстослойным будем считать такое покрытие, в котором распределением температуры по его толщине при расчете параметров режима нагрева нельзя пренебрегать.

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_{cn}), 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.

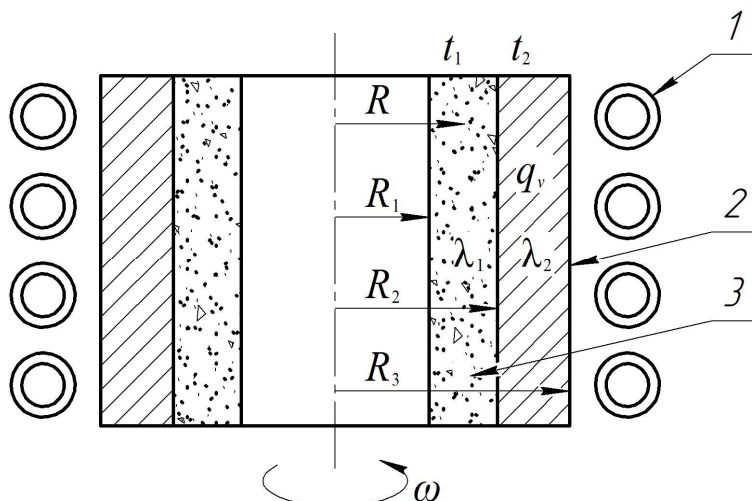


Рисунок 1. Схема ЦИН толстослойных покрытий:
1 – индуктор; 2 – заготовка; 3 – порошок

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

$$\bar{R} = \frac{R}{R_3}, \tag{3}$$

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

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

Наносимое покрытие из порошковых бронзовых шихт является парамагнитным, в то время как материал заготовки (сталь) – ферромагнитным. Учитывая это, тепловыделением в материале покрытия при внешнем индукционном нагреве можно пренебречь по сравнению с тепловыделением в заготовке. На основании этого, исходя из (4), распределение температуры t , по толщине покрытия описывается выражением

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

а распределение температуры t_2 по толщине заготовки – выражением

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

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

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

и

$$t_2|_{\bar{R}=1} = T_3, \tag{8}$$

где T_3 – температура наружной поверхности заготовки.

Условия сопряжения на границе раздела слоев имеют вид:

$$t_1 \Big|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}} = t_2 \Big|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}} \tag{9}$$

и

$$\lambda_1 \frac{dt_1}{d\bar{R}} \Big|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}} = \lambda_2 \frac{dt_2}{d\bar{R}} \Big|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}} . \tag{10}$$

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 :

$$\frac{A_1}{\lambda} \frac{R_3}{R_1} = 0; \tag{11}$$

$$B_2 - C \Big|_{\bar{R}=1} = T_3; \tag{12}$$

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

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

где

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

Отсюда:

$$A_1=0; \tag{16}$$

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

$$B_2 = C \Big|_{\bar{R}=1} + T_3; \tag{18}$$

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

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:

$$T_1 = \frac{R_2}{R_3} \ln \frac{R_2}{R_3} \frac{dC}{d\bar{R}} \Big|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}} - C \Big|_{\bar{R}=1} - T_3; \tag{20}$$

$$T_2 = \frac{R_2}{R_3} \ln \bar{R} \frac{dC}{d\bar{R}} \Big|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}} - C + C \Big|_{\bar{R}=1} + T_3 . \tag{21}$$

Значения C , $C|_{\bar{R}=1}$, $\frac{dC}{d\bar{R}}|_{\bar{R}=\frac{R_2}{R_3}}$ можно рассчитать по методике, разработанной в работе [5].

Анализ решения (20) – (21) позволяет сделать следующие выводы:

- 1) Температура наплаваемого порошкового слоя постоянна по его сечению и не зависит от толщины слоя и его теплопроводности.
- 2) Распределение температуры по сечению заготовки не зависит от толщины порошкового слоя и его теплопроводности.
- 3) Температура порошкового слоя равна температуре внутренней поверхности заготовки.

Таким образом, на основании проведенного анализа основных особенностей технологии ЦИН и сделанных допущений математически строго показано, что толщина порошкового слоя не оказывает влияния на термические режимы изотермической выдержки в процессе ЦИН. Следовательно, для расчета термических режимов ЦИН толстослойных покрытий можно пользоваться расчетными соотношениями для ЦИН тонкослойных покрытий [5].

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

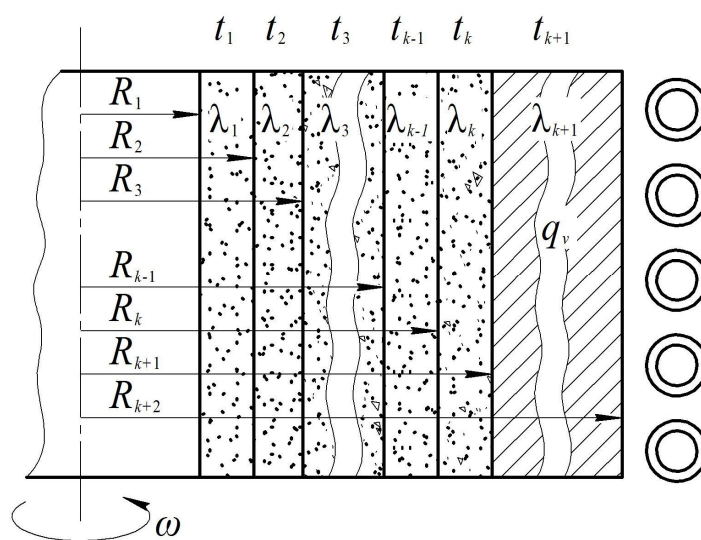


Рисунок 2. Схема ЦИН многослойных покрытий

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.

3. Заключение

В результате анализа технологического процесса центробежной индукционной наплавки (ЦИН) толстослойных и многослойных порошковых покрытий на стадии изо-

термической выдержки в рамках разработанной теплофизической модели математически строго установлено следующее:

- температура наплаваемого 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.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Белявин, К. Е. Индукционное упрочнение быстроизнашивающихся деталей узлов трения порошковыми покрытиями / К. Е. Белявин, И. А. Сосновский, А. Л. Худолей // Актуальные проблемы прочности: монография. В 2-х т. / под ред. В. В. Рубаника. – Витебск: УО «ВГТУ», 2018. – Т. 1. – С. 272-290.
2. Сосновский, И. А. Контроль и регулирование режимов нагрева в процессе центробежной индукционной наплавки порошковых покрытий / И. А. Сосновский, К. Е. Белявин, М. А. Белоцерковский, А. А. Курилёнок, О. О. Кузнечик // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы VI международной научно-практической конференции / ред.кол.: Маляревич А. М. (гл.ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2018. – С. 21-22.
3. Белоцерковский, М. А. Технологические особенности изготовления разъемных биметаллических подшипников скольжения, получаемых центробежным индукционным методом / М.А. Белоцерковский, К.Е. Белявин К.Е., И.А. Сосновский, А.Л. Худолей, А.А. Куриленок // Актуальные вопросы машиноведения; сб. научн.тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2018. – Вып. 7. – С. 134-137.
4. Белоцерковский, М. А. Особенности индукционной наплавки антифрикционных порошковых шихт с добавками наноразмерных компонентов / М. А. Белоцерковский, А. А. Курилёнок, И. А. Сосновский, А. Е. Черепко // Актуальные вопросы машиноведения; сб. научн.тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С. Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2014. – Вып. 3. – С. 374-376.
5. Сосновский, И. А. Термические параметры центробежного индукционного нанесения порошковых покрытий / И. А. Сосновский, Ю. Н. Гафо. – Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84. – № 6. – С. 1135-1142.

Поступила в редколлегию 25.01.2019 г.