

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПОРОШКОВОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ИНДУКЦИОННОМ ПРИПЕКАНИИ

Гафо Ю.Н.¹, Сосновский И.А.¹, Радченко А.А.²

¹ ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»,
г. Минск, Беларусь, e-mail: sos3@tut.by

² Институт сварки и защитных покрытий, г. Минск, Беларусь,
e-mail: aradch@wpc-i.anitex.by

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.

Технология нанесения покрытия заключается в следующем: во внутреннюю полость заготовки помещают объемную дозу порошкового материала, через антипригарные прокладки с торцов закрывают заготовку крышками. Сборку устанавливают и закрепляют на центробежной установке, осуществляют позиционирование заготовки относительно индуктора. Затем сборку приводят во вращение вокруг собственной оси и нагревают индуктором ТВЧ. При помощи оптического пирометра измеряют и контролируют достижение требуемой температуры $0,7-0,95 T_{пл}$. После спекания порошкового материала и припекания покрытия нагрев отключают, а при охлаждении заготовки до 600-900К прекращают вращение, затем сборку снимают с центробежной установки и охлаждают ее до комнатной температуры в статическом состоянии. Полученное покрытие обрабатывают в требуемый размер.

Как показано нашими теоретическими и экспериментальными исследованиями, основанными на использовании феноменологической теории ползучести порошковых материалов [2], выражение для определения распределения пористости по толщине порошкового слоя в зависимости от времени и материальной координаты r_0 :

$$P = P_0 \exp \left[A_0(t) \left(C_1 - C_0 \frac{r_0^2}{2} \right) \right]$$

(1)

Соотношение устанавливающее взаимосвязь между радиусом произвольной точки порошкового слоя в пространственной (неподвижной) системе координат $r/(t)$ и ее радиусом в материальной (движущейся) системе координат $r_0(t)$:

$$r = \sqrt{R_1^2 - \frac{2(1-P_0)}{C_0 A_0} \left[\ln \frac{e^{A_0 \xi} + \frac{1}{P_0}}{e^{A_0 \xi_1} + \frac{1}{P_0}} - A_0 (\xi - \xi_1) \right]}$$

(2)

Таким образом, используя соотношения (1) и (2) всегда можно рассчитать распределение пористости по толщине получаемого покрытия в зависимости от времени припекания t . Зависимость толщины покрытия от времени $H(t)$ определяется на основании (2) выражением (3) [3]:

$$H = R_1 - \sqrt{R_1^2 - \frac{2(1 - \Pi_0)}{A\ell_0 A_0} \left[\ln \frac{e^{A_0 \xi_0} + \frac{1}{\Pi_0}}{e^{A_0 \xi_1}} - A_0(\xi_0 - \xi_1) \right]}.$$

(3)

Здесь:

$$\xi_0 = C_1 - C_0 \frac{R_0^2}{2}; \quad \xi_1 = C_1 - C_0 \frac{R_1^2}{2}; \quad C_1 = \frac{1}{4} \frac{(16 - 2\Pi_0)R_0^2 C_0 + 3\Pi_0 \frac{R_1^4}{R_0^2}}{4 + \Pi_0 + 3\Pi_0 \frac{R_1^2}{R_0^2}};$$

$$C_0 = \frac{3 \omega^2 (1 - \Pi_0) \rho_k}{4 \eta_k};$$

H – толщина покрытия, м; R_1 – радиус внутренней поверхности детали, м; R_0 – начальное расстояние свободной поверхности порошкового слоя от оси вращения, м; Π_0 – начальная пористость порошкового материала, %; ℓ_0 – длина покрытия, м; A , A_0 – параметры, определяемые экспериментально; η_k – коэффициент сдвиговой вязкости материала порошка, Н·с/м²; ρ_k – пикнометрическая плотность материала порошка, кг/м³.

В результате анализа закономерностей кинетики уплотнения в процессе центробежного индукционного припекания порошковых покрытий выведено уравнение (1), определяющее распределение пористости по толщине получаемых покрытий в зависимости от технологических режимов, исходных свойств наносимых материалов и геометрических параметров исходных заготовок. Анализ полученного уравнения кинетики уплотнения показывает, что пористость в покрытиях, полученных методом центробежного припекания, распределяется неравномерно по толщине покрытия и уменьшается по мере удаления от свободной поверхности порошка. Повышенная пористость в зоне рабочей поверхности покрытия обеспечивает хорошие условия для аккумуляции смазочного материала, а пониженная пористость у поверхности основы позволяет повысить адгезионную прочность.

Уравнение кинетики уплотнения получено в аналитической форме и инженерном виде и, в связи с этим, поддается математическому и физическому анализу. Для расчетов по этому уравнению не требуется применения сложных приближенных вычислительных методов с использованием ЭВМ, достаточно использования обычного калькулятора для инженерных расчетов. Применение выведенного уравнения позволяет обоснованно прогнозировать технологические параметры получаемых покрытий и рационально проектировать технологические процессы центробежного индукционного припекания.

В результате проведенных исследований установлено, что параметры пористой структуры получаемых покрытий оказывают влияние на их работоспособность. В частности, наиболее значимыми параметрами пористой структуры в данном случае при использовании технологии центробежной индукционной наплавки и припекания являются пористость порошкового слоя и относительная площадь контакта между покрытием и основой.

В результате индукционного нагрева, распределение температуры по толщине слоя при индукционном припекании является неравномерным. Также в результате действия центробежных сил в процессе ЦИП неравномерно распределяются напряжения в порошковом слое. Вследствие воздействия этих факторов получаемые при ЦИП покрытия характеризуются неравномерным распределением пористости по толщине покрытия, что оказывает влияние на прочностные свойства покрытия: прочность, демпфирующие свойства покрытия, триботехнические свойства покрытий, в том числе самосмазываемость и др.

Показано, что снижение пористости получаемого слоя ведет к увеличению прочности сцепления покрытия с основой. Увеличение частоты вращения заготовки и времени изотермической выдержки ведут к снижению пористости получаемого слоя.

Формирование пористой структуры порошкового покрытия определяется технологическими режимами его нанесения. Основными из них являются температура, время и скорость вращения заготовки. Эти параметры в свою очередь зависят от частоты и мощности нагрева, геометрических параметров наплавляемых деталей, теплофизических и электрофизических свойств наносимого материала и детали и др.

Вместе с тем следует отметить, что все эти параметры являются независимыми и одну и ту же структуру можно получить, реализуя различную их комбинацию. В связи с этим можно поставить вопрос о поиске сочетания технологических параметров, обеспечивающих достижение оптимальной работоспособности изделия при заданных его параметрах.

Литература

1. Дорожкин Н.Н., Кашицин Л.П., Абрамович Т.М., Кирпиченко И.А. Центробежное припекание порошковых покрытий при переменных силовых воздействиях / Под ред. В.Г. Горобцова. – Мн.: Навука і тэхніка, 1993. -159 с.
2. Гафо Ю.Н. Определяющие уравнения феноменологической теории ползучести порошковых материалов / В кн.: «Защитные покрытия, сварка и контроль: мат. докл. Междунар. техн. конф., Минск, 30 апреля 2006 г./ Ред. кол. А.Ф. Ильюшенко и др. – Мн., 2006.- С. 18-19.
3. Гафо Ю.Н., Сосновский И.А. Разработка математической модели процесса формирования порошкового покрытия при центробежном индукционном припекании // Ю.Н. Гафо, И.А. Сосновский // Математические модели и алгоритмы для имитации физических процессов. Материалы международной научно-технической конференции (11-14 сентября, 2006, Таганрог, Россия). Т.1. Физико-математические и физико-технические модели и алгоритмы для имитации физических процессов // Таганрогский государственный педагогический институт.- Таганрог: Изд-во Таганрогского гос. пед. института, 2006. – С. 94-98.