

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ТЕПЛОМ И МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В.А. Жорник, Ю.А. Прокопенко

*Кафедра общей и теоретической физики, ГОУ ВПО «Таганрогский
государственный педагогический институт»; zhornik@land.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: деформации; напряжения; спекание; пористость.

Аннотация: Приводится расчет спекания и усадки порошкового покрытия на внутренней поверхности металлической трубы центробежным индукционным методом. Порошковый слой моделируется сплошной средой с вязкоупругими постоянными, зависящими от пористости. Сравниваются расчетные значения усадки порошкового покрытия с экспериментальными данными.

Для упрочнения и восстановления деталей машин на их рабочие поверхности наносят металлические порошковые покрытия [1]. При этом кинетика спекания порошкового слоя во многом определяет физико-механические, эксплуатационные и геометрические характеристики получаемых покрытий (износостойкость, твердость, усадка и др.).

Одним из методов нанесения таких покрытий является метод центробежного индукционного спекания порошковых покрытий [2]. В этом методе спекание порошкового слоя на внутренней поверхности цилиндрической детали производится вращением цилиндрической детали вокруг ее оси с внешним индукционным нагревом. Таким образом, в качестве основных активирующих факторов спекания выступают температура и величина центробежных сил. Модель, выбранная для расчета, заключается в следующем. До достижения температуры спекания порошковый слой считается сыпучей средой, оказывающей лишь давление на основу за счет центробежных сил. Этот слой формируется равномерно по всей внутренней поверхности детали и сохраняет эту форму под действием центробежных сил. Начало процесса спекания означает, что между частицами порошкового слоя появляются силы сцепления, поэтому вместо сыпучей среды рассматривается уже вязкоупругая пористая среда с открытыми порами. В общем случае процесс спекания в пренебрежении лапласовским давлением происходит под действием как механических напряжений, вызванных центробежными силами, так и температурных напряжений, вызванных неравномерным нагревом.

Термомеханические характеристики порошкового материала зависят от пористости и описываются соотношениями [3]:

$$\rho = \rho_m(1 - \theta);$$

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_m(1-\theta)^2; \\ \frac{1}{K} &= \frac{1}{K_m(1-\theta)} + \frac{3}{4\mu_m} \frac{\theta}{(1-\theta)^3}; \\ \eta &= \eta_m(1-\theta)^2; \\ \xi &= \frac{4}{3}\eta_m \frac{(1-\theta)^3}{\theta}; \\ \theta &= \frac{V - V_m}{V}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$(2)$$

где θ – пористость среды; V – объем пористой среды, м³; ρ – плотность пористой среды, кг/м³; μ – модуль сдвига, Н/м²; K – объемный модуль упругости, Н/м²; η и ξ – сдвиговая и объемная вязкости, Н·с/м².

Индекс «м» обозначает соответствующие характеристики монолитного материала, из которого изготовлен порошок.

Предполагается, что вязкоупругая среда описывается моделью Максвелла (последовательно соединенные упругий и вязкий элементы), что справедливо для металлов, нагретых до высоких температур [4]. Поэтому скорости упругих и вязких деформаций суммируются. В этом случае первый инвариант тензора скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}_{kk}$ вязкоупругой среды, с учетом упрощений [5], выражается функцией

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{kk} = \frac{p}{\xi} = \frac{\dot{\theta}}{1-\theta}, \quad (3)$$

а тензор-девиатор скоростей деформации вязкоупругой среды имеет вид

$$\dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \left(\frac{p}{\xi} + \frac{1}{K} \dot{p} + 3\alpha_T \dot{T} \right) \delta_{ij} = \frac{1}{2\eta} (\sigma_{ij} - p\delta_{ij}) + \frac{1}{2\mu} (\dot{\sigma}_{ij} - \dot{p}\delta_{ij}), \quad (4)$$

где $p = \frac{1}{3}\sigma_{kk}$ – среднее напряжение, Н/м²; α_T – коэффициент термического расширения, К⁻¹; T – температура слоя, К; $\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{V}}{V}$, с⁻¹. Точка над буквой означает дифференцирование данной величины по времени.

Уравнения (3) и (4) являются основными для решения задачи о процессе спекания порошкового покрытия на внутренней поверхности цилиндрической детали. Эти уравнения являются нелинейными ввиду того, что реологические характеристики пористого тела μ , η , K , ξ зависят от пористости θ , которая, в свою очередь, зависит от времени. Поэтому не представляется возможным получить точные аналитические решения этих уравнений. В связи с этим весь интервал времени спекания порошкового покрытия разбивается на n равных промежутков времени длительностью τ , в течение каждого из которых, при расчете напряженно деформированного состояния, пористость считается неизменной во времени и равной значению в конце предыдущего интервала спекания.

Чтобы получить решение данной задачи для i -го промежутка времени, необходимо расписать уравнение (4) в цилиндрической системе координат, заменив производные по времени отношениями конечных приращений:

$$\varepsilon_{rr}^i = \frac{1}{E^i} \left[\sigma_{rr}^i - \nu^i (\sigma_{\varphi\varphi}^i + \sigma_{zz}^i) \right] + \alpha_T (T^i - T^{i-1}) + F_{rr}^{i-1};$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\varphi\varphi}^i &= \frac{1}{E^i} \left[\sigma_{\varphi\varphi}^i - \nu^i (\sigma_{zz}^i + \sigma_{rr}^i) \right] + \alpha_T (T^i - T^{i-1}) + F_{\varphi\varphi}^{i-1}; \\ \varepsilon_{zz}^i &= \frac{1}{E^i} \left[\sigma_{zz}^i - \nu^i (\sigma_{rr}^i + \sigma_{\varphi\varphi}^i) \right] + \alpha_T (T^i - T^{i-1}) + F_{zz}^{i-1};\end{aligned}\quad (5)$$

$$E_i = \left(\frac{\tau}{3\eta} + \frac{1}{3\mu} + \frac{\tau}{9\xi} + \frac{1}{9K} \right)^{-1};$$

$$\nu^i = \left(\frac{\tau}{6\eta} + \frac{1}{6\mu} - \frac{\tau}{9\xi} - \frac{1}{9K} \right) \left(\frac{\tau}{3\eta} + \frac{1}{3\mu} + \frac{\tau}{9\xi} + \frac{1}{9K} \right)^{-1};\quad (6)$$

$$F_{rr}^{i-1}(r) = \varepsilon_{rr}^{i-1} + \left(\frac{1}{6\mu} - \frac{1}{9K} \right) \sigma_{kk}^{i-1} - \frac{1}{2\mu} \sigma_{rr}^{i-1};$$

$$F_{\varphi\varphi}^{i-1}(r) = \varepsilon_{\varphi\varphi}^{i-1} + \left(\frac{1}{6\mu} - \frac{1}{9K} \right) \sigma_{kk}^{i-1} - \frac{1}{2\mu} \sigma_{\varphi\varphi}^{i-1};$$

$$F_{zz}^{i-1}(r) = \varepsilon_{zz}^{i-1} + \left(\frac{1}{6\mu} - \frac{1}{9K} \right) \sigma_{kk}^{i-1} - \frac{1}{2\mu} \sigma_{zz}^{i-1};$$

где σ_{rr}^i , $\sigma_{\varphi\varphi}^i$, σ_{zz}^i , ε_{rr}^i , $\varepsilon_{\varphi\varphi}^i$, ε_{zz}^i – соответственно радиальные, окружные и осевые напряжения и деформации; E_i и ν_i – эффективные модуль Юнга и коэффициент Пуассона, зависящие от пористости θ_{i-1} на предыдущем промежутке времени спекания.

В результате вычисления на i -м этапе напряжений σ_{rr}^i , $\sigma_{\varphi\varphi}^i$, σ_{zz}^i находится p_i . Решение уравнения (3) определяет пористость $\theta_i(t)$ на i -м промежутке времени спекания, в том числе и в конце интервалов разбиения

$$\theta_i(\tau) = 1 - [1 - \theta_{i-1}] \exp \left[- \frac{p_i}{\xi_{i-1}} \tau \right].\quad (7)$$

Численные расчеты проводились для случая спекания порошкового слоя при постоянной температуре, в предположении, что основа жесткая.

В начальный момент времени (момент начала спекания), согласно принятой модели, срабатывает только упругий элемент (вязкие составляющие еще не успевают развиваться), и порошковый слой рассматривается как упругая пористая среда с упругими постоянными, рассчитанными по формулам (1). Исходя из этого, рассчитываются начальные напряжения σ_{ij}^0 и деформации ε_{ij}^0 . Значения начальных пористости θ_0 и внутреннего радиуса r_{00} задаются из эксперимента, расчета или из каких-либо других источников.

Расчеты пористости выполняются до тех пор, пока разность значений пористости θ_i , рассчитанной на i -м временном шаге, и θ_{i-1} , рассчитанной на $(i-1)$ -м временном шаге, не станет меньше или равной некоторой наперед заданной величины h ($\theta_i - \theta_{i-1} \leq h$). Если задано какое-то конкретное значение пористости покрытия θ_k , то расчеты ведутся до достижения этой заданной пористости ($\theta_i = \theta_k$). Таким образом, можно определить время изотермической выдержки,

необходимое для получения покрытия с заданной пористостью (если это значение достижимо).

Величина усадки $\Delta r_i = r_{0i} - r_{00}$ при этом рассчитывается из следующих соображений. В процессе спекания пористого покрытия происходит увеличение внутреннего радиуса покрытия r_{0i} , поэтому он обозначен с индексом i .

На каждом i -м временном шаге r_{0i} определяется из закона сохранения массы порошка при спекании

$$\iiint_V \rho(\theta_i) dV = \pi \left[r_c^2 - (r_0^M)^2 \right] \rho_M l, \quad (8)$$

где r_0^M – внутренний радиус покрытия при нулевой пористости, м; l – длина цилиндра, м. Или с учетом уравнения (1)

$$\int_{r_{0i}}^{r_c} (1 - \theta_i) \rho d\rho = \frac{r_c^2 - (r_0^M)^2}{2} = \frac{m}{2\pi l \rho_M}, \quad (9)$$

где m – масса порошка.

На основании определения из уравнения (9) значения r_{0i} , рассчитывается усадка $(r_{0i} - r_{00})$, что позволяет в реальных условиях при нанесении покрытий снижать величину припуска на последующую обработку. Расчет пористости и усадки выполнялся для случая нанесения покрытия из порошка БрОФ-10-1 методом центробежного индукционного спекания порошкового слоя и прилегания его на внутреннюю поверхность цилиндрической детали, выполненной из стали 45, имеющей длину $l = 0,19$ м, внутренний радиус $r_c = 0,08$ м. Начальная толщина порошкового слоя составляла $5,5 \cdot 10^{-3}$ м. Процесс усадки рассматривался при различных температурах спекания порошка из интервала 0,8–0,9 температуры плавления основного компонента порошковой шихты (бронзы). Скорости вращения детали ω , определяющие величину центробежного давления, изменялись в пределах от 50 до 157 рад/с. При расчетах там, где это не оговорено особо, применялись следующие данные: $\rho_M = 8760$ кг/м³; $\mu_M = 0,45 \cdot 10^{11}$ Па; $\eta_M = 0,183 \cdot 10^6$ Па·с; $K_M = 0,181 \cdot 10^{12}$ Па; начальная пористость $\theta_0 = 0,35$; начальный радиус свободной поверхности порошкового слоя $r_{00} = 0,0745$ м; временной интервал разбиения $\tau = 4$ с. Расчет производился на компьютере при помощи программ, составленных на основании блок-схемы (рис. 1).

Характер изменения основных параметров, характеризующих процессы спекания порошкового слоя, показаны на нижеприведенных графиках.

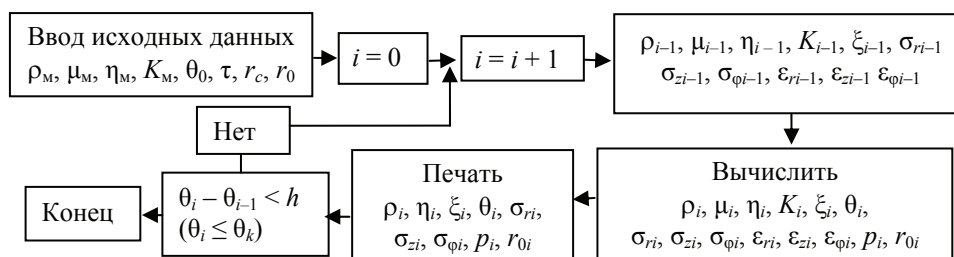


Рис. 1. Блок-схема

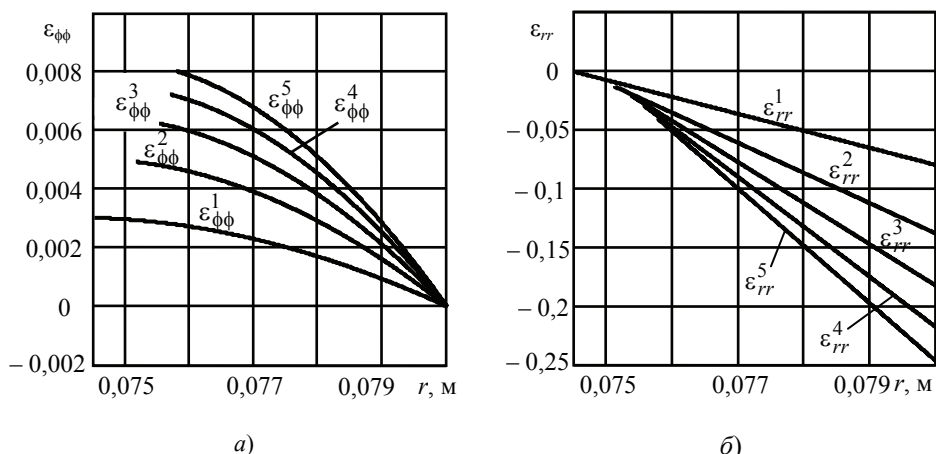


Рис. 2. Изменение деформаций в процессе спекания:
a – окружных; *б* – радиальных

На рис. 2, *a*, *б* показаны графики изменения окружных и радиальных деформаций по толщине порошкового слоя на 1–5-м шагах процесса спекания при $\eta_M = 0,183 \cdot 10^6$ Па·с, $\omega = 50$ рад/с.

Ввиду того что по предположению основа жесткая, окружные деформации на контакте равны нулю, что хорошо иллюстрируется на графиках (см. рис. 2, *a*). Равны нулю также осевые деформации, которые в работе не приведены.

При постоянной температуре спекания или, что то же самое, при постоянном значении сдвиговой вязкости η_M порошкового материала пористость покрытия уменьшается со временем тем быстрее, чем больше значение скорости вращения детали.

Сказанное выше иллюстрируется графиками на рис. 3, *a* – *в*.

Из этих же графиков видно, что при постоянном значении скорости вращения детали пористость покрытия уменьшается тем быстрее, чем выше температура спекания порошка.

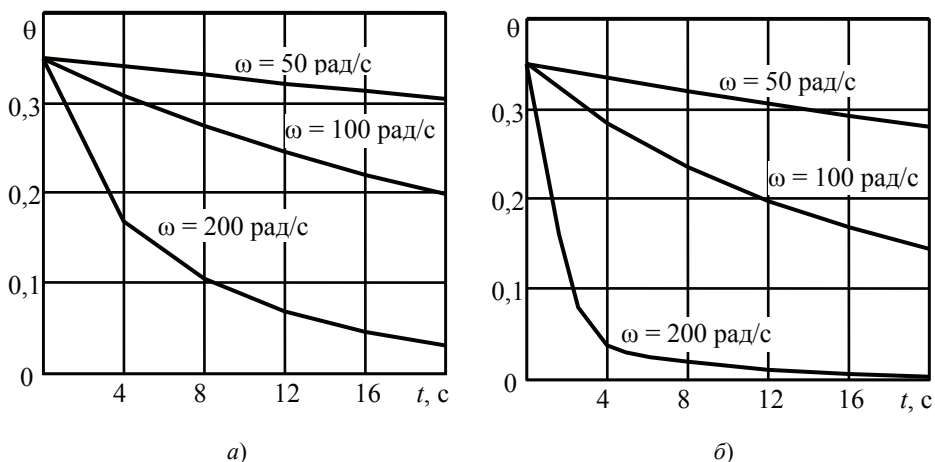


Рис. 3. Зависимость пористости покрытия θ от времени спекания t при температуре T , К (начало):
a – 1123 ($\eta_M = 0,96 \cdot 10^6$ Па·с); *б* – 1173 ($\eta_M = 0,6 \cdot 10^6$ Па·с)

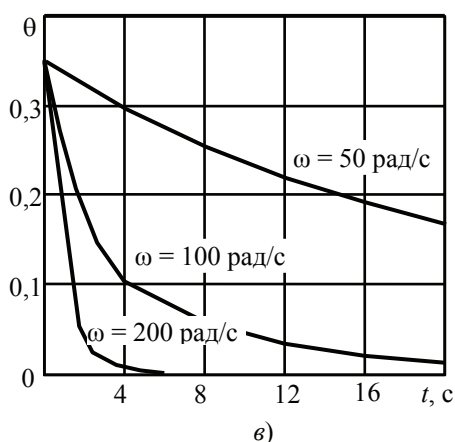


Рис. 3. (окончание):
 $\sigma = 1248$ ($\eta_M = 0,183 \cdot 10^6$ Па·с)

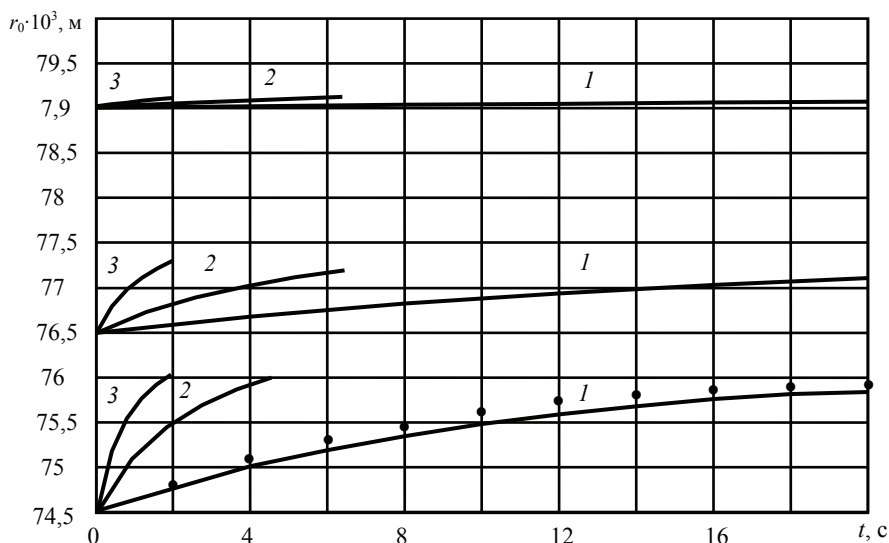


Рис. 4. Зависимость усадки порошкового слоя от времени на поверхности и внутри порошкового слоя при $\eta_M = 0,183 \cdot 10^6$ Па·с при регулярных скоростях вращения детали ω , рад/с: 1 – 50; 2 – 100; 3 – 200

Приведенные зависимости пористости от температуры спекания и скорости вращения детали (величины центробежных сил) могут быть использованы при задании времени изотермической выдержки при получении покрытий с заданной пористостью.

Скорость усадки порошкового слоя находится в такой же зависимости от температуры спекания и величины центробежных сил, что и пористость.

На рис. 4 приведены теоретические кривые усадки порошкового слоя на различных глубинах. Там же приведены экспериментальные данные усадки (обозначенные точками) на поверхности покрытия [5].

Из рисунка видно, что экспериментальные точки, которые относятся к теоретической кривой для $\omega = 50$ рад/с, расположены несколько выше реальных значений. Это, по-видимому, объясняется некоторым уплотнением порошкового слоя при нагревании вращающейся детали до температуры спекания и приближенным характером вычислений.

Работа выполнена в Научно-образовательном эколого-аналитическом центре юга России ЮФУ при финансовой поддержке Фонда CRDF и Министерства Образования РФ по Российско-американской программе «Фундаментальные исследования и высшее образование» (BRHE) и программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Рособразования РФ (проекты Р.Н.П. 2.2.2.2.3915, ВРЗС04, ВР4М04, Р.Н.П. 2.2.2.2.3.10012, У-4-М-04-08).

Список литературы

1. Дорожкин, Н.Н. Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками / Н.Н. Дорожкин. – Минск : Наука и техника, 1975. – 152 с.
2. О напряженном состоянии цилиндра с внутренним порошковым покрытием в процессе центробежного индукционного припекания / Н.Н. Дорожкин [и др.] // Весті АН БССР, Сер. фіз-тэхн. навук. – 1994. – № 3. – С. 63–70.
3. Герасимов, Б.Я. Термовязкоупругость пористого цилиндрического тела / Б.Я. Герасимов, М.Б. Штерн // Порошковая металлургия. – 1985. – № 5. – С. 89–92.
4. Паркус, Г. Неуставившиеся температурные напряжения / Г. Паркус. – М. : Физматгиз, 1963. – 251 с.
5. Жорник, А.И. Развитие дефектов в деформируемых твердых телах при механических и тепловых воздействиях : дис. ... д-ра ф.-м. наук : 05.13.16 : защищена 28.06.2000 : утверждена 08.12.2000 / Жорник Александр Иванович. – Москва, 2000. – 440 с.

Modeling of Processes of Powder Coating Sintering under Heat and Mechanical Effects

V.A. Zhornik, Yu.A. Prokopenko

*Department of General and Theoretical Physics,
Taganrog State Teachers' Training Institute; zhornik@land.ru*

Key words and phrases: deformation; porosity; sintering; tension.

Abstract: The paper presents the calculation of sintering and shrinking of powder coating on the inner surface of metal tube by centrifugal induction method. Powder coating is modeled by continuum with viscoelastic constants dependent on porosity. The calculated amounts of powder coating shrinkage and the experimental data are compared.

Modellierung der Prozesse der Versinterung der Pulverdeckungen bei den thermischen und mechanischen Einwirkungen

Zusammenfassung: Im Artikel wird die Berechnung der Versinterung und der Kontraktion der Pulverdeckung auf der inneren Oberfläche des Metallrohres durch die zentrifugalen Induktionsmethode angeführt. Die Pulverschicht wird durch das kontinuierlichen Medium mit den von der Porosität abhängenden viskoelastischen Konstanten modelliert. Es wird die Vergleichung der Rechenwerte der Kontraktion der Pulverschicht mit den experimentellen Angaben durchgeführt.

Modélage des processus de l'agglutination des couvertures en poudre lors des actions thermiques et mécaniques

Résumé: Dans l'article est cité le calcul de l'agglutination et de la contraction sur la surface intérieure du tube métallique par la méthode centripète inductive. La couche en poudre est modélée par le milieu continu avec les constantes viscoélastiques dépendant de la porosité. Est donnée la comparaison des grandeurs de calcul de la contraction de la couverture en poudre avec les données expérimentales.

Автор: *Жорник Виктория Александровна* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и теоретической физики; *Прокопенко Юрий Александрович* – аспирант кафедры общей и теоретической физики, ГОУ ВПО «Таганрогский государственный педагогический институт».

Рецензент: *Карташов Эдуард Михайлович* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая и прикладная математика», ГОУ ВПО «Московская государственная академия тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова».
