УДК 621.792

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ УПЛОТНЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ СЛОЕВ ПРИ ВИБРОАКТИВАЦИИ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

канд. техн. наук, доц. А.А. ЛЫСОВ, А.С. АРШИКОВ
(Полоцкий государственный университет)
канд. техн. наук, доц. Ю.М. ГАФО
(Белорусский научно-производственный концерн порошковой металлургии)

Рассмотрена кинетика уплотнения при получении покрытий из металлических порошков на поверхностях изделий. Развивается один из вариантов феноменологической теории ползучести - теории течения с учетом влияния вибрации на процесс деформирования порошковых слоев.

Для повышения эффективности технологии получения покрытий из порошковых материалов используются различные факторы, активирующие физико-химические процессы, в результате которых происходит уплотнение порошкового слоя.

Одним из факторов, влияющих на кинетику уплотнения порошковых покрытий, а также на формирование контактов частиц порошка между собой и с поверхностью изделия, является вибросиловое активирование, когда порошковый слой одновременно с давлением подвергается воздействию вибрации.

Кинетику уплотнения при получении покрытий из металлических порошков на поверхностях изделий можно описать с помощью феноменологической теории ползучести [1]. В данной работе развивается один из вариантов этой теории - теория течения с учетом влияния вибрации на процесс деформирования порошковых слоев.

Основные положения этой теории состоят в следующем:

1. Сопротивление деформации при изменении объема пористого тела изменяется во времени и является функцией скорости объемной деформации ускорения сдвига $\ddot{\gamma}$, пористости θ:

$$\sigma_m = \varphi(\dot{\varepsilon}_m, \theta, \ddot{\gamma}_i, t)\ . \tag{1}$$

2. Сопротивление деформации сдвига изменяется во времени и является функцией интенсивности скоростей деформаций сдвига $\ddot{\gamma}_i$, ускорения сдвига и пористости:

$$\tau_i = \psi(\dot{\gamma}_i, \ddot{\gamma}_i, \theta, t), \tag{2}$$

3. Девиатор скоростей деформаций $Д_{\dot{\varepsilon}}$ пропорционален девиатору напряжений $Д_\sigma$:

$$Д_{\dot{\varepsilon}} = \dot{\chi} Д_\sigma, \tag{3}$$

причем коэффициент пропорциональности $\dot{\chi}$ является функцией интенсивности скоростей деформаций сдвига, пористости, ускорения колебаний и времени t.

Здесь $\sigma_m = \dfrac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ – среднее нормальное напряжение; $\dot{\sigma}_m = \dfrac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ – средняя скорость линейной деформации; $\tau_i = \dfrac{1}{\sqrt{6}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ – интенсивность касательных напряжений; $\gamma_i = \sqrt{\dfrac{2}{3}}\sqrt{(\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2)^2 + (\dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_3)^2 + (\dot{\varepsilon}_3 - \dot{\varepsilon}_1)^2}$ – интенсивность скоростей деформаций сдвига; σ_1, σ_2, σ_3 – главные напряжения; $\dot{\varepsilon}_1$, $\dot{\varepsilon}_2$, $\dot{\varepsilon}_3$ – главные скорости линейных деформаций.

Соотношение (3) можно записать в виде, аналогичном уравнениям Сен-Венана – Леви – Мизеса [2]:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} - \delta_{ii} \cdot \varepsilon_m = \dot{\chi}(\delta_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m) \tag{4}$$

с той, однако, разницей, что соотношение (4) учитывает скорость объемной деформации, а функция $\dot{\chi}$, входящая в него, имеет вид:

$$\dot{\chi} = \frac{\dot{\gamma}_i}{2\tau_i} = \frac{\dot{\gamma}_i}{2\psi(\dot{\gamma}_i, \ddot{\gamma}_i, \theta, t)}. \tag{5}$$

В соотношении (4) $\dot{\varepsilon}_{ij}$ и σ_{ij} – компоненты соответственно тензора скоростей деформаций и тензора напряжений; δ_{ij} – символ Кронекера.

Если воспользоваться формулами (1) и (5), то уравнение (4) можно записать в форме, аналогичной уравнениям вязкого течения:

$$\sigma_{ij} = 2\eta\left(\dot{\varepsilon}_{ij} - \delta_{ij}\dot{\varepsilon}_m\right) + 3\xi\delta_{ij}\dot{\varepsilon}_m, \tag{6}$$

где

$$\eta = \frac{\tau_i}{\dot{\gamma}_i} = \frac{\psi\left(\dot{\gamma}_i, \ddot{\gamma}_i, \theta, t\right)}{\dot{\gamma}_i} \tag{7}$$

и

$$\xi = \frac{\sigma_m}{3\dot{\varepsilon}_m} = \frac{\varphi\left(\dot{\varepsilon}_m, \ddot{\gamma}_i, \theta, t\right)}{\varepsilon_m} \tag{8}$$

соответственно коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости.

Для решения задач кинетики уплотнения порошковых материалов и покрытий при вибросиловом активировании необходимо задать конкретный вид функций и в зависимости от входящих в них параметров.

Связь между сопротивлением сдвигу дисперсных материалов и ускорением колебаний при вибрации можно описать зависимостью экспоненциального вида [3].

В соответствии с этим для случая горячей обработки давлением металлических порошковых материалов примем

$$\tau_i = \tau_{i(0)} e^{-a\ddot{\gamma}}, \tag{9}$$

где $\tau_{i(0)}$ – сопротивление сдвигу при отсутствии вибрации (эмпирический коэффициент). Подставляя (9) в (7), получим

$$\eta = \frac{\tau_{i(0)} e^{-\ddot{\gamma}}}{\dot{\gamma}_i} = \eta e^{-a\ddot{\gamma}}, \tag{10}$$

где

$$\eta_0 = \frac{\tau_{i(0)}}{\dot{\gamma}_i} = \frac{\psi_0\left(\dot{\gamma}_i, \theta, t\right)}{\dot{\gamma}_i}, \tag{11}$$

η_0 – коэффициент сдвиговой вязкости пористого тела при отсутствии вибрации.

Коэффициент сдвиговой вязкости пористого тела определяется через коэффициент сдвиговой вязкости материала твердой фазы соотношением [4]:

$$\eta_0 = \psi(\theta)\eta_K. \tag{12}$$

В то же время для твердой фазы в пористом теле соблюдается следующее соотношение, соответствующее теории течения [2]:

$$\tau_i = B(t)\dot{\gamma}_i^m, \tag{13}$$

где показатель степени *m* и функциональный параметр *B(t)* определяются из опытов на ползучесть,

тогда

$$\eta_K = B(t)\dot{\gamma}_i^{m-1}. \tag{14}$$

Подставляя (12) и (14) в (10), получим

$$\eta = \psi(\theta)B(t)\dot{\gamma}_i^{m-1} e^{-a\ddot{\gamma}}. \tag{15}$$

Коэффициент объемной вязкости связан с коэффициентом сдвиговой вязкости и коэффициентом поперечной деформации ν следующей зависимостью:

$$\xi = \frac{2}{3} \cdot \frac{1+\nu}{1+2\nu}\eta. \tag{16}$$

Поскольку ν является однозначной функцией пористости [4], учитывая (6), (8), (15), нетрудно показать, что соотношение (16) соблюдается только в том случае, если

$$\xi = \frac{1}{3}\left[\frac{1+\nu(\theta)}{1-2\nu(\theta)}\right]^m \psi(\theta)A(t)\dot{\varepsilon}_m^{m-1} e^{-a\ddot{\gamma}}, \tag{17}$$

где

$$A(t) = 2^m 3^{\frac{m-1}{2}} B(t). \tag{18}$$

Таким образом, учитывая соотношения (16) и (17), уравнение (6) можно записать в следующем виде;

$$\sigma_{ij} = A(t)e^{-a\dot{y}}\varepsilon_m^{m-1}\psi(\theta)\left(\frac{1+\nu}{1-2\nu}\right)\left[\frac{1-2\nu}{2(1+\nu)}\left(\dot{\varepsilon}_{ij}-\delta_{ij}\dot{\varepsilon}_m\right)+\delta_{ij}\varepsilon_m\right] = = A(t)e^{-a\dot{y}}\varepsilon_m^{m-1}\psi(\theta)\left(\frac{1-2\nu}{2(1+\nu)}\right)^m\left[\frac{1-2\nu}{2(1+\nu)}\dot{\varepsilon}_{ij}+\frac{4\nu+1}{2(1+\nu)}\delta_{ij}\dot{\varepsilon}_m\right]. \tag{19}$$

Если принять [5]

$$\psi(t) = 1-\theta \tag{20}$$

и [4]

$$\nu = \frac{2-3\theta}{4-3\theta}, \tag{21}$$

то, учитывая соотношение [4], имеем

$$\dot{\varepsilon}_m = \frac{d\theta}{(1-\theta)dt}. \tag{22}$$

Выражение (19) можно записать в следующем виде:

$$\sigma_{ij} = A(t)e^{-a\dot{y}}2^m\frac{\dot{\theta}^{m-1}(1-\theta)^2}{\theta^m}\left[\frac{\theta}{2(1-\theta)}\dot{\varepsilon}_{ij}+\frac{(4-5\theta)\dot{\theta}}{4(1-\theta)^2}\delta_{ij}\right]. \tag{23}$$

Уравнения (23)описывают связь между компонентами тензоров напряжений, скоростей, деформаций и пористостью при деформировании пористого тела. Используя эти уравнения, можно получить формулы для расчета кинетики уплотнения порошковых слоев для конкретных схем нагружения, соответствующих реальным технологическим процессам. Так, например, для случая формования порошкового слоя в закрытой прессформе ($\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$; $\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_1}{3}$; $\sigma_1 = -p$) из соотношения (23) нетрудно получить уравнение кинетики уплотнения:

$$-2\frac{\dot{\theta}}{\theta} = \left(\frac{e^{a\dot{y}}}{A(t)}p\right)^{\frac{1}{m}}. \tag{24}$$

Пусть

$$\left(\frac{1}{A(t)}\right)^m = \frac{c}{t^{в}}. \tag{25}$$

Тогда, проинтегрировав выражение (24), получим:

$$\ln\frac{\theta_0}{\theta} = \frac{1}{2}Cp^{\frac{1}{m}}e^{a\dot{y}}\frac{t^{1-в}}{1-в}. \tag{26}$$

Вибрационное воздействие порошковому слою передается от поверхности основы, совершающей гармонические колебания, причем направление вибровоздействия перпендикулярно направлению действия статической нагрузки. Поэтому для того, чтобы описать кинетику уплотнения порошковых покрытий, необходимо определить закономерности распределения колебаний по толщине слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гафо Ю.Н., Гимельфарб В.И., Завистовский С.Э. Применение методов теории ползучести при расчетах процессов получения порошковых изделий и покрытий // Исследование и разработка теоретических проблем в области порошковой металлургии; Тез. докл. конф. - Мн., 1983. - С. 158 - 162.
2. Малинин И.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. - М.: Машиностроение, 1975. - 400 с.
3. Цитович Н.А. Механика грунтов. - М.: Высшая школа, 1983. - 288 с.
4. Феноменологическая теория прессования порошков / М.Б. Штерн, Г.Г. Сердюк, Л.А. Максименко и др. - Киев: Наукова думка, 1982. - 140 с.
5. Мартынова И.Ф., Штерн М.Б. Уравнение пластичности пористых тел, учитывающее истинные деформации металла основы // Порошковая металлургия. - 1978. - № 1. - С. 23 - 29.