

В.В. Скороход, М.Б. Штерн
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СПЕКАНИЯ ПОРИСТО - ТРЕЩИНОВАТЫХ
СРЕД, СОВМЕЩЕННОГО С РАСТЯЖЕНИЕМ

Рассматривается процесс уплотнения пористого материала, содержащего плоские дефекты при спекании, совмещенном с действием растягивающих напряжений. Анализ проводится в рамках обобщенной модели пористого тела, содержащего наряду с порами континуум трещинообразных дефектов. В рамках данной модели получены соотношения кинетики уплотнения и удлинения. Их анализ позволяет сделать вывод о замедлении спекания и объясняет возможное при ползучести разрыхление за счет дефектов указанного типа. Форм. 15. Рис. 3. Лит. 6.

В.В. Скороход, М.Б. Штерн
ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ СПІКАННЯ ПОРИСТО - ТРІЩИНУВАТИХ СЕРЕДОВИЩ,
ПОЄДНАНОГО З РОЗТЯГУВАННЯМ

Розглядається процес ущільнення пористого матеріалу, що містить площинні дефекти за рахунок одночасної дії спікання та зовнішнього розтягуючого напруження. Аналіз процесу базується на узагальненій моделі пористого середовища, що містить також площинні дефекти. На підставі даної моделі отримано співвідношення для кінетики ущільнення та осрової деформації. Їх використання дозволяє зробити висновок про уповільнення спікання та можливість розпушення за рахунок при повзучості за рахунок дефектів даного типу.

V. Skorokhod, M. Shtern
SOME FEATURES OF SPEKANIYA OF PORISTO-TRESCHINOVATYKH ENVIRONMENTS,
COMBINED WITH TENSION

The densification of porous material containing plain defects is considered. The extended model of porous body, sensitive to given type of defects is used. On the base of model there were obtained relationships for kinetic of densification and straining. Obtained results leads to conclusion that plain defects slow down the densification and make possible the loosening under creep.

Рассматривается процесс спекания, совмещенный с одноосным растяжением пористого материала, который наряду с порами содержит трещины. В дальнейшем они рассматриваются как двумерные дефекты. Основной целью настоящего рассмотрения является оценка влияния плотности этих дефектов на уплотнение (скорость уменьшения пористости) и усадку образцов, изготовленных из данного материала, в направлении одной из осей.

Побудительным мотивом настоящего исследования послужила достаточно давно возникшая проблема о влиянии двумерных дефектов на поведение материалов, полученных методами порошковой металлургии. Следует отметить, что наличие в материале дефектов подобного типа уже давно рассматривается как один из наиболее характерных атрибутов порошковых материалов, сопровождающих как технологии их получения так и условия эксплуатации [1,5]. В частности, в работах [1,6] обобщены идеи о вкладе двумерных дефектов в такие свойства как проводимость, модули упругости, скорости распространения малых возмущений. В указанных работах такой вклад определяется за счет использования специального параметра θ_s , отвечающего за наличие дефектов подобного типа.

Между тем, к числу дискуссионных принадлежит вопрос о влиянии указанного типа дефектов на технологические аспекты поведения порошковых материалов. Прежде всего, имеется в виду спекание. Реальное воплощение данного процесса обычно связано с проявлением факторов, способствующих не только уплотнению и формированию внутренних границ, но также и локальному разрыхлению. Их причиной может оказаться чрезмерное схватывание образца со стенками печи или. Другая причина характерна для процессов припекания покрытия к подложке и родственных им, когда возникающие вследствие схватывания касательные напряжения порождают кинематические ограничения усадки. В таких условиях двумерные дефекты не только не залечиваются, но могут раскрываться и в ходе продолжающегося спекания сливаться друг с другом, образуя трещиноподобные дефекты, ощущаемые на макроуровне.

Исследованию указанного явления посвящена данная статья. Предпринимается простейшая попытка его изучения путем имитации данного явления процессом спекания, совмещенного с одноосным растяжением.

Анализ процесса проводится в рамках континуальной теории спекания изотропных тел. Предполагается, что размеры пор намного меньше размеров трещин, которые, в свою очередь, существенно меньше, чем размеры образца в целом. Допускается, что ориентация трещин носит

хаотический характер и в ходе деформирования материал не приобретает анизотропию. Предполагается также, что приложенные извне силы и кинематические ограничения не приводят к неоднородному с макроскопической точки зрения распределению параметров при спекании.

Серия изложенных предположений позволяет изучать влияние спекания и растяжения в существенно упрощенной постановке, не требующей использования сложных численных методов. Нижеследующее рассмотрение сводится к анализу поведения прямого кругового цилиндра, подверженному действию растягивающих деформаций и спекания (Рис. 1).

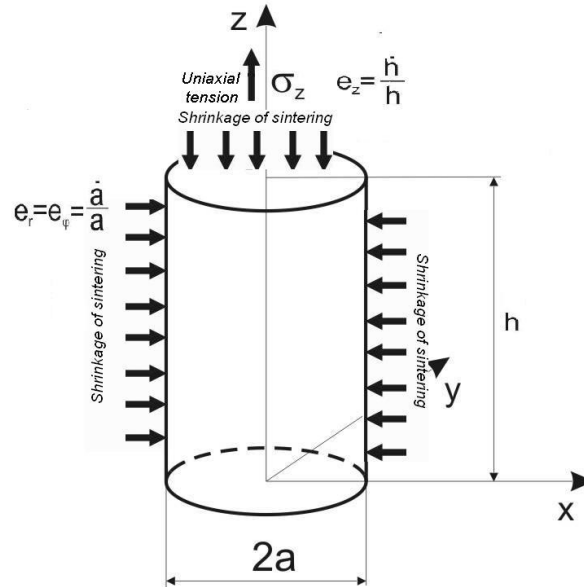


Рис.1. Схема процесса спекания, совмещенного с одноосным растяжением

Для описания данного процесса используется реологическая теория спекания [1] в континуальной формулировке [2]. В таком виде спекаемое тело представляет собой двухфазную среду, содержащую наряду с основной матрицей поры и трещины. Предполагается, что поведение матрицы и пор описываются в рамках представлений, развитых в [2]. При этом реологические параметры пористого тела определяются в соответствии с [1]

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_0(1 - \theta)^2 \\ \nu &= \frac{2 - 3\theta}{4 - 3\theta} \\ \zeta &= \frac{4}{3} \eta_0 \frac{(1 - \theta)^3}{\theta} \end{aligned} \quad (1)$$

Лапласовское давление определяется как

$$P_l = 3(1 - \theta)^2 \frac{\sigma}{r_0} \quad (2)$$

Реологические соотношения спекаемого пористого тела [1,2] принимаются в виде

$$\sigma_{ij} = 2\eta \left(u_{ij}^* - \frac{1}{3} u_{ll}^* \delta_{ij} \right) + \zeta u_{ll}^* \delta_{ij} + P_l \delta_{ij} \quad (3)$$

В дальнейшем полагаем

$$x^* = \frac{dx}{dt}$$

Скорость объемной деформации, плотность, пористость связаны между собой простыми соотношениями, вытекающими из закона сохранения массы

$$u_{ll}^* = -\frac{\rho^*}{\rho} = \frac{\theta^*}{1-\theta} \quad (4)$$

Наличие наряду с порами двумерных дефектов учитывается в рамках обобщенной модели Р.Л. Салганика [3].

$$u_{ll} > 0 : \zeta_c = \zeta \left(1 - \frac{16(1-\nu^2)}{9(1-2\nu)} c \right); \quad (5)$$

$$u_{ll} < 0 : \zeta_c = \zeta ;$$

$$u_{ll} > 0 : \eta_c = \eta \left(1 - \frac{32(5-\nu)(1-\nu)}{45(2-\nu)} c \right) \quad (6)$$

Выражение для объемного коэффициента вязкости (5) теряет смысл при пористостях, близких к нулю. Поэтому вместо соотношений (5) и (6) используются им эквивалентные по порядку малости параметра c .

$$\zeta_c^{(+)} = \zeta \frac{1}{1 + \frac{16(1-\nu^2)}{9(1-2\nu)} c} \quad (7)$$

$$\eta_c^{(+)} = \eta \frac{1}{1 + \frac{32(5-\nu)(1-\nu)}{45(2-\nu)} c} \quad (8)$$

Для пористого тела, содержащего трещины вводится эффективное Лапласовское давление

$$P_{lc} = \frac{\zeta_c}{\zeta} P_l$$

Данное соотношение выражает тот факт, что в отсутствии внешних сил наличие двумерных дефектов не сказывается на кинетике спекания.

Обобщенное реологическое уравнение пористого тела, содержащего трещины, записанное на основе (3), имеет вид

$$\sigma_{ij} = 2\eta_c \left(u_{ij}^* - \frac{1}{3} u_{ll}^* \delta_{ij} \right) + \zeta_c u_{ll}^* \delta_{ij} + P_{lc} \delta_{ij} \quad (9)$$

При о осесимметричном нагружении пористого образца, содержащего трещины

$$\sigma_r = 2\eta_c \left(u_r^* - \frac{1}{3} u_{ll}^* \right) + \zeta_c u_{ll}^* + P_{lc} \quad (10)$$

$$\sigma_z = 2\eta_c \left(u_z - \frac{1}{3} u_{II} \right) + \zeta_c u_{II} + P_{lc}$$

При этом выражения для скоростей изменения объема и осевой скорости деформации могут быть представлены в виде

$$u_{II} = -\frac{P_l}{\zeta} + \frac{\sigma_z}{3\zeta_c} \tag{11}$$

$$u_z = -\frac{P_l}{3\zeta} + \left(\frac{1}{9\zeta_c} + \frac{1}{3\eta_c} \right) \sigma_z$$

Выражения для скорости изменения объема после подстановки в него выражений для ζ_c и ζ принимают вид

$$u_{II} = \frac{1}{\frac{4}{3}\eta_0(1-\theta)^3} \left(-P_l\theta + \frac{\sigma_z}{3} \left(\theta + \frac{64(1-\theta)}{9(4-3\theta)}c \right) \right) \tag{12}$$

В результате учета соотношений и обозначений

$$P_l = 3(1-\theta)^2 \frac{\sigma}{r_0}; \quad \sigma_z = p; \quad u_{II} = \frac{\theta}{1-\theta}$$

приходим к выражению для скорости изменения пористости

$$\dot{\theta} = \frac{\theta}{4\eta_0} \left(\frac{p}{(1-\theta)^2} - 9 \frac{\sigma}{r_0} \right) + \frac{p}{\eta_0} \frac{1}{(4-3\theta)(1-\theta)} \frac{16}{9} c \tag{13}$$

которое при $c = 0$, т.е. в отсутствии трещин, обращается в уравнение для суммарной скорости изменения пористости при одновременном действии спекания и растяжения [4]. В результате подстановки выражения для обобщенных реологических параметров в выражение для скорости осевой деформации можно получить также уравнение для изменения осевой деформации, которое в предположении, что пористость мала имеет вид

$$u_z = -\theta \frac{3\sigma}{4\eta_0} + \left(\frac{1}{3\eta_0} + \frac{\theta}{12\eta_0} + c \left(\frac{68}{135\eta_0} + \frac{179\theta}{135\eta_0} \right) \right) p \tag{15}$$

Уравнения (13) и (15) представляют собой систему обыкновенных дифференциальных уравнения, решение которых позволяет определить кинетику уплотнения и удлинения спекаемого образца для заданных значений начальной пористости θ_0 и параметра c . Еще одним параметром, который влияет на кинетику уплотнения является отношение осевого давления к Лапласовскому - σ_z . Результаты соответствующих расчетов, основанные на решении данной системы методом Рунге - Кутты приведены на Рис. 2,3.

$$\theta_0 = 0.3, \quad c = 0, \quad \sigma_z = 0.5$$

$$\theta_0 = 0.3, \quad c = 0, \quad \sigma_z = 0.5$$

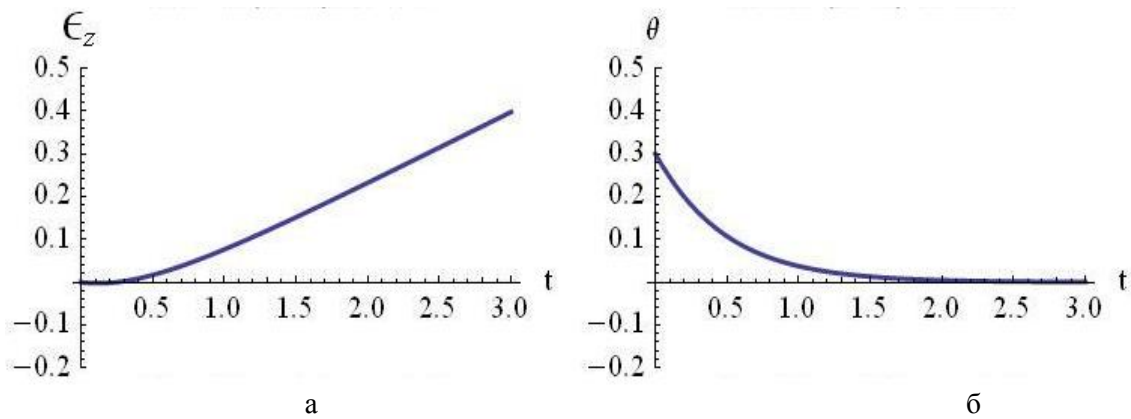


Рис. 2. Кинетика изменения осевой деформации ϵ_z и пористости θ при начальной пористости, равной 0.3 в отсутствие двумерных дефектов

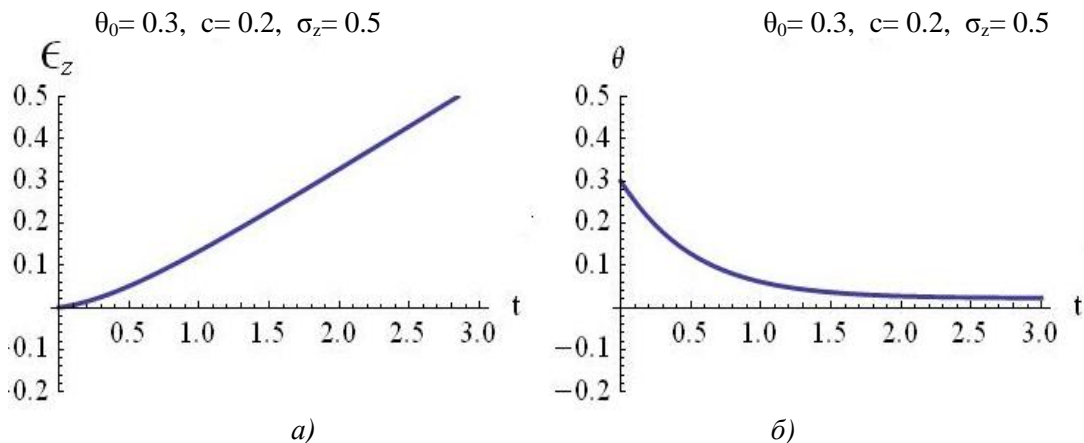


Рис. 3. Кинетика изменения осевой деформации ϵ_z и пористости θ при начальной пористости, равной 0.3 и концентрации двумерных дефектов, равной 0.2

Наиболее **существенный вывод** данного рассмотрения вытекает как из рисунков 2 и 3 так и из непосредственного анализа соотношения (13). Заметим, что первое слагаемое в правой части данного соотношения полностью совпадает с результатом первого из авторов [4], полученным в предположении, что материал не содержит плоских дефектов. Второе слагаемое появилось в результате использования обобщенной модели спекания материала, содержащего наряду с порами плоские дефекты. Соотношение (13) позволяет сделать вывод, что двумерные дефекты при растяжении раскрываются и служат источником порообразования. Именно указанный фактор замедляет усадку, о чем свидетельствует сравнение кривых на рисунках 2б и 3б. В том случае, когда начальная пористость отсутствует, формула (13) предсказывает увеличение объема при ползучести в условиях растяжения. Полученные здесь результаты позволяют утверждать, что данное явление, сопровождающее ползучесть не только порошковых материалов, может быть отнесено за счет наличия в них трещин, образовавшихся под контролем известных механизмов дефектообразования.

1. В.В. Скороход. Реологические основы теории спекания. К.: Наукова думка, 1972, – 149 с.
2. V.V. Skorokhod, M. B. Shtern, E.A. Olevsky, Continuum theory for sintering of porous bodies: model and application // Science of Sintering. – 1991. – 23, №2 – P. 79-91.
3. Р.Л. Салганик, Механика сред с большим числом трещин, Механика твердого тела, Известия АН СССР, 1974, №4.
4. В.В. Скороход, Реологические задачи в теории спекания металлических порошков // Сб. докладов IV Международной конференции по порошковой металлургии. – ЧССР, 1974, – Т.1 – С. 19-30.
5. М.Ю. Бальшин, Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. – М.: Металлургия. – 1972, 336 с.
6. О.В. Роман, В.В. Скороход, Г.Р. Фридман, Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии, Мн. Вш. Шк. 1989, – 182 с.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2013.