

DOI: 10.5862/JEST.243.14

УДК 621.762

В.Н. Цеменко, Д.В. Фук, С.В. Ганин

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ
ПОРОШКОВЫХ И ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ.
ЧАСТЬ 2. ПОРИСТОЕ ТЕЛО**

V.N. Tsemenko, D.V. Fuk, S.V. Ganin

**DETERMINING THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND MODELING
THE EXTRUSION OF POWDER AND POROUS MATERIALS.
PART 2. POROUS BODY**

В работе выполнено исследование процессов пластической деформации металлических материалов с использованием численных методов, в частности методом конечных элементов. На основе анализа процесса деформации идеализированной модели пористого тела разработана расчетно-экспериментальная методика определения реологических характеристик пористого материала по известным механическим характеристикам материала частиц. Рассмотрена идеализированная модель пористого тела, с помощью которой осуществлено математическое моделирование процесса деформации представительной элементарной ячейки в виде 1/8 куба со сферической порой. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными по прессованию пористого материала АКВ-2.5. Это свидетельствует о практической возможности применять при математическом моделировании процессов уплотнения пористых материалов разработанную расчетно-экспериментальную методику определения реологических характеристик пористого тела по известным значениям предела текучести материала частиц.

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ; КОМПАКТИРОВАНИЕ; МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ; ПЛОТНОСТЬ.

The paper investigates the plastic deformation processes in metal materials using the numerical methods, in particular, the finite-element method. The calculation and experimental technique developed for determining the rheological characteristics of a porous material is performed according to the well-known mechanical characteristics of the material's particles on the basis of analyzing the deformation of an idealized model of a porous body. We have considered an idealized model of the porous body, based on which we simulated the deformation process of a representative elementary cell shaped as 1/8th of a cube with a spherical pore. The simulation results are in good agreement with the experimental data on the pressing of the АКВ-2.5 porous material. This means it is possible to use the developed calculation and experimental technique for determining the rheological characteristics of a porous body from the known yield point values of the particle material for simulating the consolidation processes of porous materials.

POWDER METALLURGY; COMPACTION; MATHEMATICAL MODELLING; PLASTIC DEFORMATION; DENSITY.

Введение

Разработка новых технологий порошковой металлургии позволяет эффективнее использо-

вать ее возможности по созданию материалов с повышенными эксплуатационными свойствами [1–9]. Для отработки новых технологических процессов, в том числе пластической деформа-

ции порошковых и пористых материалов, широко применяется математическое моделирование. Это позволяет изучать влияние различных технологических факторов на свойства заготовок без проведения дорогостоящих экспериментов.

В первой части данного исследования была представлена методика определения реологических характеристик порошковых материалов с использованием структурно-феноменологического подхода, основанного на идеализированной модели с элементарной ячейкой в виде кубика с частицей сферической формы, окруженной многогранной порой. Практическое применение такой модели реализовано для процесса уплотнения порошкового материала при холодной пластической обработке.

В практике порошковой металлургии широко применяется метод горячего уплотнения. При горячем уплотнении процессы компактирования и спекания совмещаются в одной операции, при этом давление уплотнения существенно снижается по сравнению с холодным прессованием. Горячее компактирование часто служит единственным методом изготовления плотных заготовок из порошковых материалов с низкими пластическими свойствами. Поскольку в процессе горячей деформации происходит частичное спекание уплотняемого порошка, то в этом случае его можно рассматривать как пористое тело, которое подчиняется эллиптическому условию пластичности [10]. В этом случае определение реологических характеристик может быть реализовано расчетно-экспериментальным методом при моделировании представительного элемента пористого тела в процессах нагружения. В работе [11] рассмотрена модель пористого тела с известным значением предела текучести матричного материала, на основе которой с использованием программного пакета Marc (разработка компании MSC Software) определены зависимости предела текучести при гидростатическом сжатии и предела текучести при чистом сдвиге от относительной плотности пористого железа. Полученные реологические характеристики пористого материала позволили моделировать процессы холодного и горячего деформирования в программном пакете Multidef (разработка Санкт-Петербургского политехни-

ческого университета), задавая предел текучести матричного материала при соответствующей процессу температуре. Однако реализованный подход, использующий два программных пакета, требует дополнительных операций, связанных с переносом данных из одного пакета в другой, и ограничивает возможности решения многих задач математического моделирования процессов пластической деформации пористых тел. При решении таких задач целесообразно использовать более универсальный программный продукт.

Целью представляемой работы является применение программного пакета ABAQUS для анализа идеализированной модели пористого тела при разработке расчетно-экспериментальной методики определения реологических характеристик пористого материала по известным механическим характеристикам матричного материала.

Методика проведения исследования и свойства материала

Воспользуемся численным методом, использованным Ю.И. Рыбиным для определения зависимости предела текучести и упругих характеристик пористых материалов от относительной плотности, в соответствии с которым исследовалась представительная элементарная ячейка в виде 1/8 куба со сферической порой [11]. Элементарная ячейка имела размеры $100 \times 100 \times 100$; радиус сферической поры варьировали в пределах R36–R80, чтобы соответствующие пористости изменялись от 0,025 до 0,268. На рис. 1 показана модель пористого тела и его представительная элементарная ячейка.

Математическое моделирование процесса деформации пористого тела

Математическое моделирование выполняли в коммерческом программном пакете ABAQUS версии 16.4. При решении задачи был реализован неявный метод (implicit) в трехмерной постановке. Контактное трение при деформации ячейки не учитывалось.

Определение реологических характеристик пористых материалов возможно при реализации условия чистого сдвига и трехосного сжатия в упругой и упругопластической зонах. Схемы нагружения показаны на рис. 2.

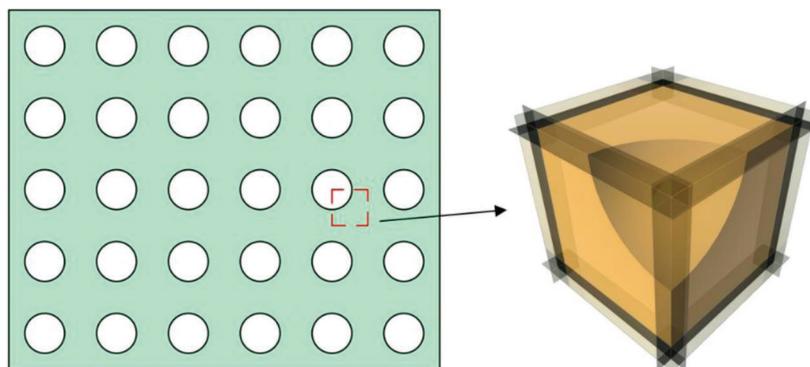


Рис. 1. Модель пористого тела и его представительная элементарная ячейка

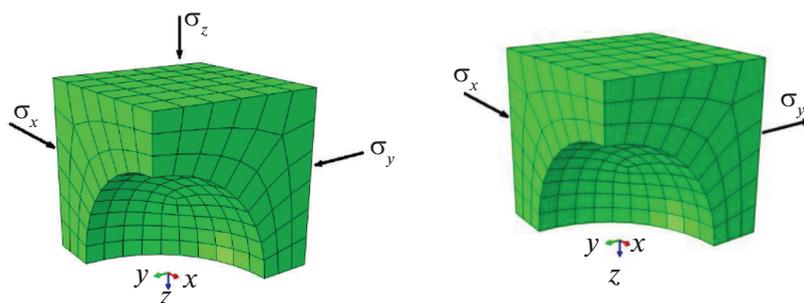


Рис. 2. Схема испытаний элементарной ячейки: а) гидростатическое сжатие; б) чистый сдвиг

В качестве матричного материала использован технический алюминий марки А1. Механические характеристики материала при нормальных условиях: модуль упругости – $E = 70000$ МПа; коэффициент Пуассона – $0,33$, предел текучести – 73 МПа.

Определение предела текучести при гидростатическом сжатии

Условия гидростатического нагружения моделировались заданием граничных условий в перемещениях, одинаковых по трем граням кубической ячейки. Скорость перемещения составляет 3 мм/с на каждой грани. Схема гидростатического сжатия представлена на рис. 2, а.

Напряжение по граням кубика p вычисляется как отношение суммы сил в узловых точках сетки конечных элементов P_i к площади грани:

$$p = \frac{\sum P_i}{F},$$

где площадь грани $F = 100 \times 100$ (мм²).

Стадии развития пластической деформации при гидростатическом сжатии на кубической ячейке со сферической порой R70 показаны на рис. 3.

На первой стадии происходила только упругая деформация (рис. 3, а). С увеличением нагрузки зона пластической деформации распространяется от контура поры к грани кубика (рис. 3, б). Далее зона пластической деформации интенсивно расширяется по мере увеличения приложенного внешнего нагружения (рис. 3, в, г). При достижении определенной степени деформации размеры зоны пластической деформации стабилизируются. При этом значении приложенной внешней нагрузки начинается пластическое течение материала. Дальнейший рост внешней нагрузки обусловлен уменьшением размера поры.

На рис. 4 представлена зависимость предела текучести кубика от относительной плотности при гидростатическом сжатии. Для сравнения были построены кривые зависимости по данным расчета Ю.И. Рыбина и Б.А. Друянова. Здесь p_s^{NM} и σ_s – со-

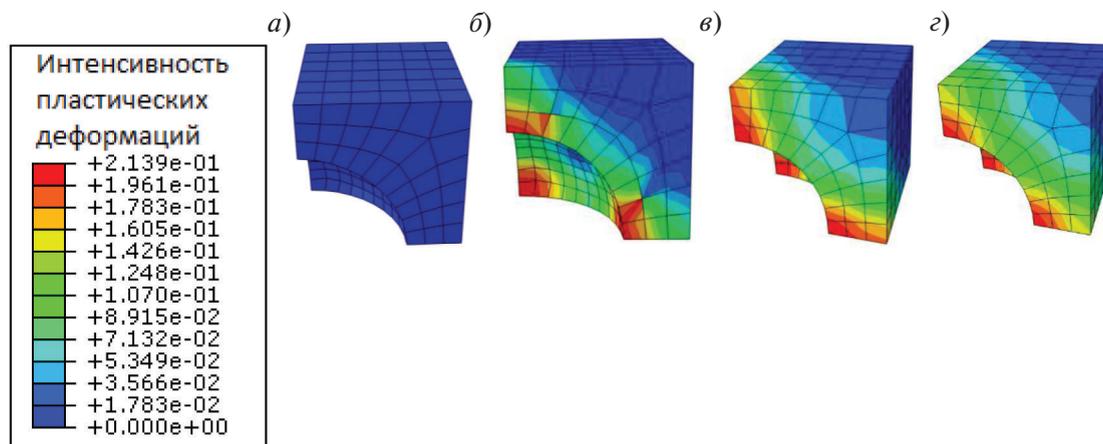


Рис. 3. Стадии развития пластической деформации в кубической ячейке со сферической порой при гидростатическом сжатии (упругая область в электронном виде – синяя)

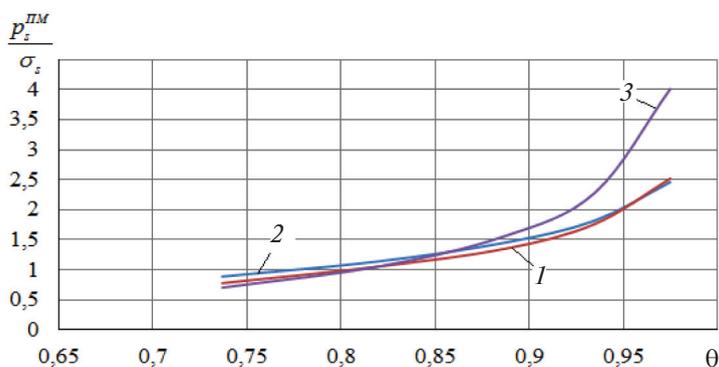


Рис. 4. Зависимости пределов текучести кубической ячейки при гидростатическом сжатии от относительной плотности θ :
 1 – по данным моделирования; 2 – по данным расчета Ю.И. Рыбина [10]; 3 – по данным расчета А.Б. Друянова [11]

ответственно предел текучести пористого и компактного материалов при гидростатическом сжатии.

Как видно из рис. 4, все кривые имеют одинаковый вид. При изменении относительной плотности в пределах от 0,74 до 0,975 предел текучести при гидростатическом сжатии изменяется от $0,75 \sigma_s$ до $2,6 \sigma_s$. Результаты, найденные по данным расчета Ю.И. Рыбина, и результаты, полученные нами при моделировании, совпадают практически полностью.

Определение предела текучести при чистом сдвиге.

Условие чистого сдвига задавали граничными условиями в перемещениях (рис. 2, б). Стадии

развития пластической деформации на кубической ячейке со сферической порой R36 показаны на рис. 5.

На начальной стадии пóра играет роль концентратора напряжений (см. рис. 5, а). Далее формируется вторая зона пластических деформаций – на стыке граней, к которым приложена внешняя нагрузка (см. рис. 5, б). Постепенно эти две зоны расширяются в направлении друг к другу (рис. 5, в). Через некоторое время эти зоны соединяются в одну, и процесс стабилизируется. Напряжение, соответствующее этому состоянию материала, может быть принято за предел текучести при чистом сдвиге.

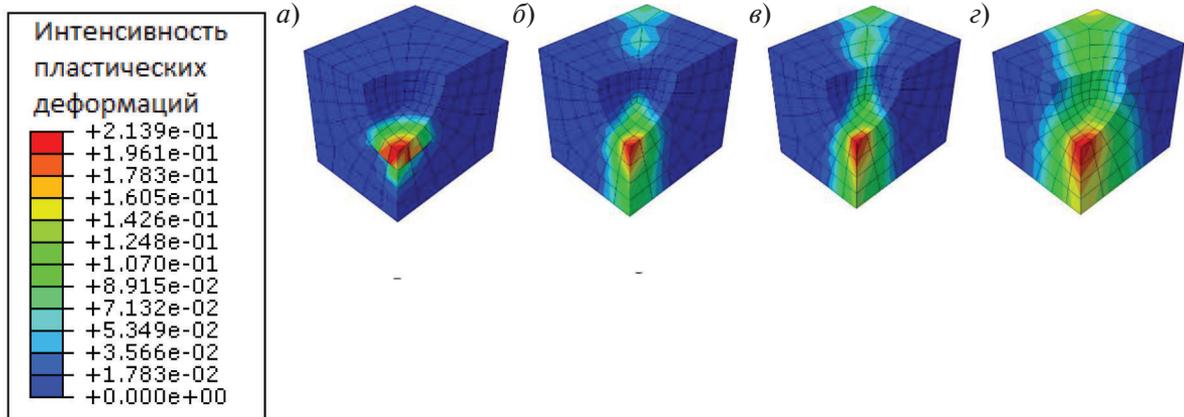


Рис. 5. Стадии развития пластической деформации в кубической ячейке со сферической порой при чистом сдвиге (упругая область в электронном виде – синяя)

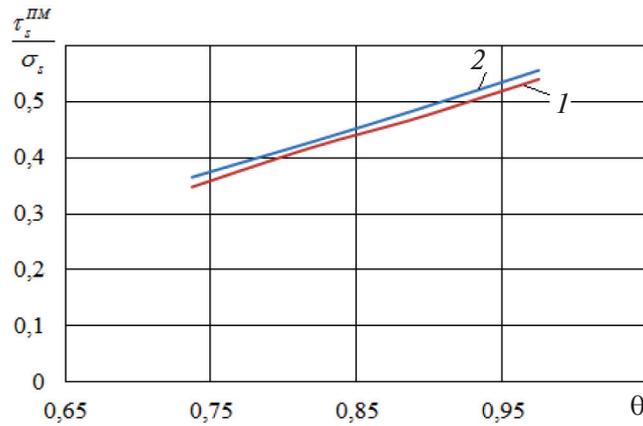


Рис. 6. Зависимость предела текучести (1 – по данным моделирования, 2 – по данным расчета Ю.И. Рыбина [11]) кубической ячейки при чистом сдвиге от относительной плотности θ

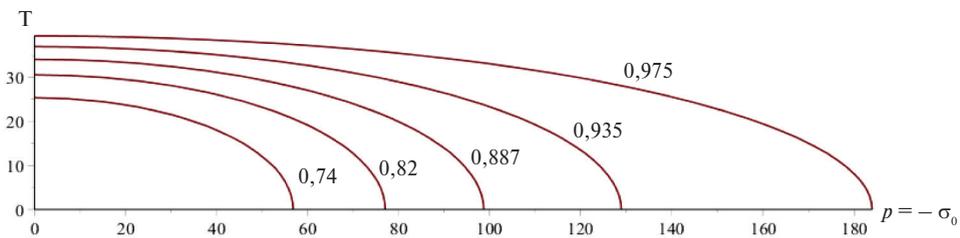


Рис. 7. Кривые текучести кубической ячейки для исследованного диапазона относительной плотности

На рис. 6 представлена зависимость предела текучести при чистом сдвиге от плотности. Для сравнения была построена кривая зависимости по данным расчета, приведенного в работе [11]. Здесь τ_s и σ_s – предел текучести соответственно

пористого и компактного материалов при чистом сдвиге.

На рис. 7 показаны кривые текучести в виде эллипсов, построенных по двум точкам, находящимся на осях T и σ_0 , – пределам текучести при гидростатическом сжатии и чистом сдвиге.

Для использования программного пакета ABAQUS и встроенной в него реологической модели Друкера–Прагера, кроме пределов текучести материала, необходимо определить и его упругие характеристики [12]. Модуль объемной деформации K определим из условий гидростатического сжатия, а модуль нормальной упругости E и коэффициент Пуассона – из условий одноосного сжатия кубической ячейки.

Определение модуля объемной деформации K .

Результаты расчета на гидростатическое сжатие представлены на рис. 8, а в виде зависимости приложенного напряжения σ_z от относительной деформации ϵ . принято: $T = 0, \sigma_0 = \sigma_z = \sigma_y = \sigma_x$.

В области упругой деформации (в ней зависимость на рис. 8, а имеет линейный характер) выполняется закон Гука

$$\sigma_0 = K\epsilon_0,$$

где $\epsilon_0 = \epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z$ – объемная деформация.

Пользуясь графиком зависимости приложенного напряжения σ_z от относительной деформации ϵ , можно вычислить модуль объемной деформации K для различных значений плотности материала.

Определение модуля упругости E и коэффициента Пуассона ν . Результаты численных экспериментов одноосного сжатия представлены на рис. 8, б в виде зависимости приложенного напряжения σ_z от относительной деформации ϵ . Для процесса одноосного сжатия верны соотношения $T = \frac{\sigma_z}{\sqrt{3}}$ и $\sigma_0 = \frac{\sigma_z}{3}$.

В области упругой деформации (то есть там, где зависимость на рис. 8, б линейна) выполняется закон Гука

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}.$$

Воспользуемся графиком зависимости приложенного напряжения σ_z от относительной де-

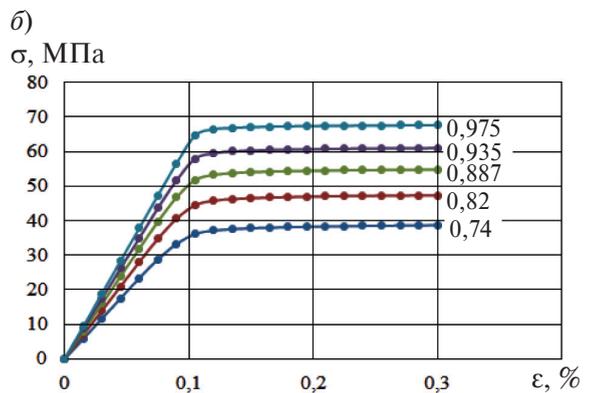
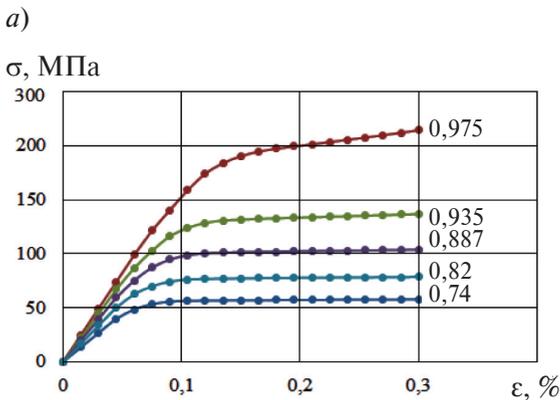


Рис. 8. Зависимости напряжения от относительной деформации кубической ячейки при разных плотностях (значения θ – цифры у кривых): а – при гидростатическом сжатии; б – при одноосном сжатии

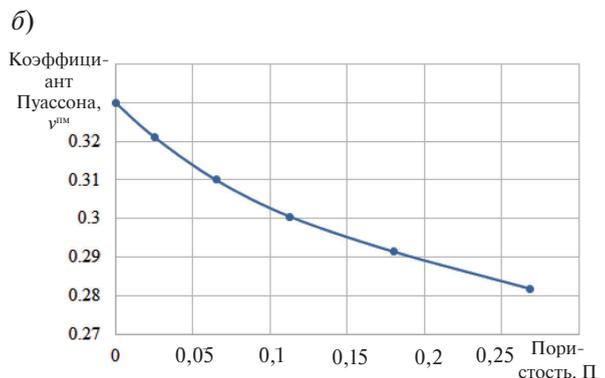
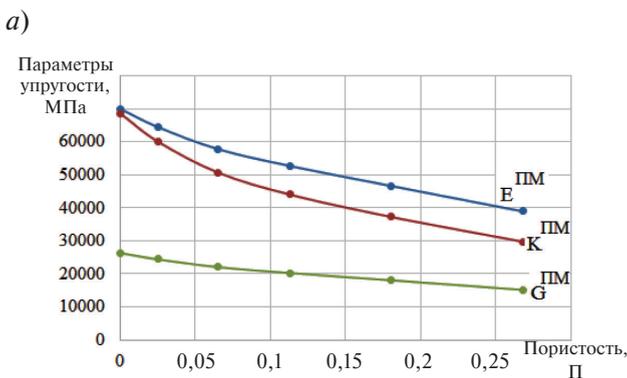


Рис. 9. Зависимость параметров упругости кубической ячейки со сферической пораами от пористости а) E, K, G ; б) ν

формации ε_z для вычисления модуля упругости E при различных плотностях.

Коэффициент Пуассона и модуль сдвига G рассчитываем по формулам [11]

$$\nu^{\text{пм}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E^{\text{пм}}}{3K^{\text{пм}}} \right); \quad G^{\text{пм}} = \frac{E^{\text{пм}}}{2(1 + \nu^{\text{пм}})}$$

Зависимость параметров упругости кубической ячейки со сферическими пораами можно представить в виде графика (рис. 9):

Результаты моделирования на 3D-моделях процессов деформации пористого материала при разных схемах нагружения позволяют заменить натурные испытания имитационным моделированием в ходе определения реологических характеристик пористых материалов для решения задач пластической деформации пористой среды.

Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментов по осадке пористого материала в капсуле при повышенной температуре

Мы выполняли математическое моделирование осадки порошкового материала в капсуле. Параметры материала и процесса деформации были выбраны теми же, что и при проведении экспериментальных исследований в работе [13].

Поскольку процесс деформирования проводится при температуре 300 °С, порошковый алюминий АКВ-2.5 можно интерпретировать как пористое тело. При этой температуре использо-

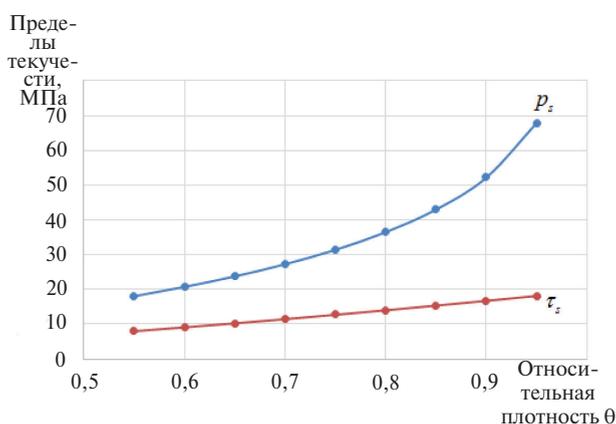


Рис. 11. Зависимости пределов текучести при гидростатическом сжатии (p_s) и чистом сдвиге (τ_s) пористого тела от относительной плотности θ при температуре 300 °С

ванный матричный материал имеет следующие механические характеристики: модуль упругости — $E = 50500$ МПа; коэффициент Пуассона — 0,33; предел текучести — 34 МПа.

На рис. 10 приведены зависимости пределов текучести при гидростатическом сжатии p_s и чистом сдвиге τ_s пористого тела на основе технического алюминия при температуре 300 °С, которые были определены на основе численного эксперимента в соответствии с представленной выше методикой.

Математическое моделирование процесса осадки порошковой заготовки в капсуле проводилось с использованием программного пакета ABAQUS и встроенной в него модели материала «DRUCKER – PRAGER» с подпрограммой, разработанной в [14]. При решении задачи был реализован явный метод (explicit) в трехмерной постановке.

На рис. 11 показано осевое сечение порошковой заготовки при деформации 45 % в сравнении с экспериментальными результатами, полученными в работе [13].

Таким образом, под действием пластической деформации оболочки произошло уплотнение заготовки за счет дополнительного воздействия гидростатической составляющей тензора напря-

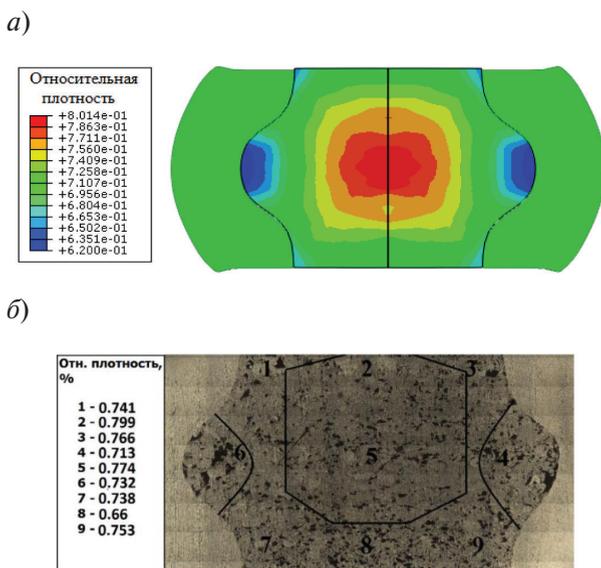


Рис. 11. Распределение плотности в порошковой заготовке при деформировании 45%: а) математическое моделирование; б) эксперимент [13]

жений в порошковой заготовке. Как видно на рис. 12, результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Различие средней плотности между практикой и моделированием составляет 4%. При этом максимальное уплотнение произошло в центре заготовки, где гидростатическое давление больше, чем в других участках. Плотность в центральных областях превышает 0,8. У краев заготовки, где произошла потеря устойчивости капсулы, явно видны зоны разрыхления материала. Плотность в этих зонах находится в интервале 0,62–0,65.

Заключение

В результате выполненного исследования на основе применения программного пакета ABAQUS проведен анализ идеализированной модели пористого тела и разработана расчетно-экспериментальная методика определения реологических характеристик пористого материала. На основании результатов моделирования деформации элементарной ячейки в виде куба со сферической порой при гидростатическом нагружении и чистом сдвиге определены зависи-

мости пределов текучести от относительной плотности, на основе которых построены кривые текучести пористого тела в виде эллипсов.

По результатам численных экспериментов для пористого алюминия марки АКВ-2.5 определен модуль объемной деформации из условий гидростатического сжатия элементарной ячейки, а модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона – из условия ее одноосного сжатия. Полученные механические характеристики пористого материала использованы для математического моделирования процесса осадки пористого материала в капсуле при температуре 300 °С. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Полученные результаты показывают возможность применения представительной ячейки в виде кубической формы со сферической порой для определения реологических характеристик пористых материалов при известном значении предела текучести матричного материала и использования полученных зависимостей этих характеристик от плотности для математического моделирования процессов уплотнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Цеменко В.Н.** Деформирование порошковых сред [Deformation of powder environments]. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2001. 104 с.
2. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме. [Technology of layer-by-layer electron beam synthesis of powder products in vacuum.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 8. С. 40–45.
3. **Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А.** Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств. [Producing of details from composite materials by method of electron beam synthesis and research of their properties] // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 2. С. 35–41.
4. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копаев В.Н.** Особенности моделирования процесса послойного синтеза изделий электронным лучом. [Features of modeling of process of layer-by-layer synthesis of products electronic beam.] // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 11. С. 91–96.
5. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н.** Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения. [Pressing of the heterophase moistened powder metal mixes for improvement of quality of high density preparations with use of a method of intensive consolidation.] // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 6. С. 12–16.
6. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н., Сизов Н.А.** Исследование процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду. [Research of process of consolidation at ultrasonic impact on the humidified powder medium.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 178. С. 148–155.
7. **Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Филимонов В.И., Кокорин А.В.** Прессование гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения. [Pressing of the heterophase moistened iron powders when using a method of intensive consolidation.] // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 5 (23). С. 13–20.
8. **Кондратьев С.Ю., Горынин В.И., Попов В.О.** Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного слоя при лазерной закалке деталей. [Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser

quenching of components.] // Сварочное производство. 2011. № 3. С. 11–15.

9. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме. [Algorithm and technological processes of synthesis of powder details an electronic beam in vacuum.] // Технология машиностроения. 2015. № 1. С. 11–16.

10. Рудской А.И., Рыбин Ю.И., Цеменко В.Н. Теория и моделирование процессов деформирования порошковых и пористых материалов. [Theory and modeling of processes of deformation of powder and porous materials.] СПб.: Наука, 2012. 415 с.

11. Друянов Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел. [Applied theory of plasticity of porous bodies.] М.: Машиностроение, 1989. 165 с.

12. Abaqus Analysis User's Guide. Volume 3: Materials. Abaqus 6.14.

13. Доан Ван Фук, Цеменко В.Н., Ганин С.В. Моделирование процесса осадки порошкового материала в оболочке [Modeling of the process rainfall of powder material in a cover.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. № 3 (226). С. 30–39. DOI 10.5862/JEST.226.4

14. Фук Д.В., Ганин С.В., Цеменко В.Н. Моделирование и исследование процесса уплотнения порошковых материалов с использованием программного пакета ABAQUS [Modeling and research of process of consolidation of powder materials with use of a software package of ABAQUS.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 1 (238). С. 100–110. DOI 10.5862/JEST.238.10

REFERENCES

1. Tsemenko V.N. Deformirovaniye poroshkovykh sred. [Deformation of powder environments]. SPb.: Izdvo SPbGPU, 2001. 104 s. (rus.)

2. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A. Tekhnologiya posloynogo elektronno-luchevogo sinteza poroshkovykh izdeliy v vakuume. [Technology of layer-by-layer electron beam synthesis of powder products in vacuum.]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2014. № 8. S. 40–45. (rus.)

3. Sokolov Yu.A., Kondratyev S.Yu., Lukyanov A.A. Polucheniye izdeliy iz kompozitsionnykh materialov metodom elektronno-luchevogo sinteza i issledovaniye ikh svoystv [Producing of details from composite materials by method of electron beam synthesis and research of their properties]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2015. № 2. S. 35–41. (rus.)

4. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A., Kopayev V.N. Osobennosti modelirovaniya protsesssa posloynogo sinteza izdeliy elektronnym luchom. [Features of modeling of process of layer-by-layer synthesis of products electronic beam]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2015. T. 85, № 11. S. 91–96. (rus.)

5. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N. Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh poroshkovykh metallicheskiykh smesey dlya povysheniya kachestva vysokoplotnykh zagotovok s ispolzovaniyem metoda intensivnogo uplotneniya [Pressing of the heterophase moistened powder metal mixes for improvement of quality of high density preparations with use of a method of intensive consolidation]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniyem*. 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)

6. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N., Sizov N.A. Issledovaniye protsesssa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu. [Research of process of consolidation at ultrasonic impact on the humidified powder medium].

Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. 2013. № 178. S. 148–155. (rus.)

7. Rudskoy A.I., Kokorin V.N., Kondratyev S.Yu., Filimonov V.I., Kokorin A.V. Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya. [Pressing of the heterophase moistened iron powders when using a method of intensive consolidation]. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)

8. Kondratyev S.Yu., Gorynin V.I., Popov V.O. Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley. [Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components]. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2011. № 3. S. 11–15. (rus.)

9. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A. Algoritm i tekhnologicheskiye protsessy sinteza poroshkovykh detaley elektronnym luchom v vakuume. [Algorithm and technological processes of synthesis of powder details an electronic beam in vacuum]. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2015. № 1. S. 11–16. (rus.)

10. Rudskoy A.I., Rybin Yu.I., Tsemenko V.N. Teoriya i modelirovaniye protsessov deformirovaniya poroshkovykh i poristykh materialov. [Theory and modeling of processes of deformation of powder and porous materials]. SPb.: Nauka, 2012. 415 s. (rus.)

11. Друянов Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел. [Applied theory of plasticity of porous bodies]. М.: Mashinostroyeniye, 1989. 165 s. (rus.)

12. Abaqus Analysis User's Guide. Volume 3: Materials. Abaqus 6.14.

13. Doan Van Fuk, Tsemenko V.N., Ganin S.V. Modelirovaniye protsesssa osadki poroshkovogo materiala v obolochke. [Modeling of the process rainfall of powder material in a cover]. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2015. № 3 (226). S. 30–39. (rus.) DOI 10.5862/JEST.226.4

14. **Fuk D.V., Ganin S.V., Tsemenko V.N.** Modelirovaniye i issledovaniye protsessa uplotneniya poroshkovykh materialov s ispolzovaniyem programmnoy paketa ABAQUS [Modeling and research of process of consolidation of powder materials with use of a software package of ABAQUS]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2016. № 1 (238). S. 100–110. DOI 10.5862/JEST.238.10

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ЦЕМЕНКО Валерий Николаевич – доктор технических наук заведующий кафедрой, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого/ 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: plast-ftim@mail.ru

TSEMENKO Valerii N. –Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: plast-ftim@mail.ru

ФУК Доан Ван – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: fukdoan@mail.ru

FUK Doan Van – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: fukdoan@mail.ru

ГАНИН Сергей Владимирович – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: S.V.Ganin@gmail.com

GANIN Sergei V. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: S.V.Ganin@gmail.com