

DOI 10.5862/JEST.243.13

УДК 621.762

В.Н. Цеменко, Д.В. Фук, С.В. Ганин

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ
ПОРОШКОВЫХ И ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ.
ЧАСТЬ 1. ПОРОШКОВОЕ ТЕЛО**

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

**DETERMINING THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND MODELING
THE EXTRUSION OF POWDER AND POROUS MATERIALS.
PART 1. POWDER BODY**

В работе исследование процессов пластической деформации металлических материалов выполнено с использованием численных методов, в частности методом конечных элементов. Разработана расчетно-экспериментальная методика определения реологических характеристик порошкового материала по известным механическим характеристикам материала частиц на основе анализа процесса деформации идеализированной модели порошкового тела. Рассмотрена идеализированная модель порошкового тела, с помощью которой осуществлено математическое моделирование процесса деформации элементарной ячейки в виде кубика со сферической частицей, окруженной многогранной порой. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными по прессованию порошкового материала АКБ-2.5 в замкнутой матрице. Это свидетельствует о практической возможности применять для математического моделирования процессов уплотнения порошковых материалов разработанную расчетно-экспериментальную методику определения реологических характеристик порошкового тела по известным значениям предела текучести материала частиц.

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

The paper has studied the process of plastic deformation of powder metal materials via various numerical methods, in particular, the finite-element method. The calculation and experimental technique developed for determining the rheological characteristics of powder materials 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 powder body. We have considered an idealized model of the powder body, based on which we simulated the deformation process of an elementary cell shaped as a cube with a spherical particle surrounded with a faceted pore. The simulation results are in good agreement with the experimental data on the pressing of the AKB-2.5 powder material in a closed matrix. This means it is possible to use the developed calculation and experimental technique for determining the rheological characteristics of a powder body from the known yield point values of the particle material for simulating the consolidation processes of powder materials.

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

Введение

Технологические процессы порошковой металлургии успешно конкурируют с традицион-

ными способами производства, а в ряде случаев являются единственными при получении изделий со специальными свойствами [1–9]. Наи-



более сложными технологическими процессами порошковой металлургии, которые определяют комплекс физико-механических и специальных свойств изделий, являются процессы уплотнения и пластического деформирования заготовок. В настоящее время активно развивается математическое моделирование процессов уплотнения порошковых материалов. С использованием результатов компьютерного и математического моделирования можно исследовать процессы пластической обработки, анализировать влияние различных технологических факторов на свойства заготовок без проведения дорогостоящих экспериментов. Для проведения компьютерного и математического моделирования процессов деформирования порошковых материалов необходимо иметь данные об их реологических характеристиках. Методика определения реологических характеристик изложена в работах [1, 10, 11]; она в основном опирается на экспериментальное изучение поведения порошковых материалов при различных схемах нагружения (одноосное растяжение, сдвиг, одноосное сжатие, сжатие в закрытой матрице и гидростатическое сжатие). Однако выполнение экспериментальных исследований не всегда целесообразно, а иногда и невозможно на существующем оборудовании, так как физико-механические свойства металлических сферических порошков из материалов с высоким уровнем прочности не могут быть точно определены экспериментально при различных схемах нагружения. В этом случае возникает необходимость заменить физическое моделирование математическим.

Цель нашей работы – создание расчетно-экспериментальной методики определения реологических характеристик порошкового материала по известным механическим характеристикам материала частиц исходя из анализа процесса деформации идеализированной модели порошкового тела.

Методика проведения исследований

Процесс уплотнения порошковых материалов условно может происходить по двум механизмам – межчастичному сдвигу (структурная деформация) и в виде пластической деформации материала самих частиц порошка. Реализация этих механизмов в большей или меньшей степени определяется мно-

гими факторами, среди которых основными являются относительная плотность, форма и размер частиц. Механические характеристики порошкового материала зависят от многих факторов, среди которых особенно следует выделить свойства материала частиц, их форму и размер.

Исследование процесса уплотнения порошковых материалов с частицами различного размера и формы показало, что размер и форма частиц порошковых материалов оказывают существенное влияние на протяженность этапа структурного деформирования [1]. При этом этап структурного деформирования протяженнее для более рыхлых в состоянии утряски материалов. Начиная с некоторой величины относительной плотности кривые уплотнения материалов одного химического состава с частицами различного размера и формы практически совпадают. Практическое совпадение кривых уплотнения для сравнительно высоких плотностей указывает на идентичность пластического сопротивления деформированию материалов с различными исходными размерами и формой частиц.

Для исследования был выбран порошок алюминия АКВ-2.5 фракции 0,63–1,0 мм. Химический состав порошка АКВ-2.5:

Наименования показателя	Химический состав % масс
Активный алюминий	не менее 98,75
Примеси, не более:	
Железо	0,45
Кремний	0,30
Медь	0,30
Графит	0,10
Влага	0,10

Механические характеристики материала частиц: модуль нормальной упругости – $E = 70000$ МПа; коэффициент Пуассона – 0,33; предел текучести – $\sigma_s = 73$ МПа. На рис. 1 представлены кривые уплотнения порошков алюминия марки АКВ-2.5 со средними размерами частиц 50 и 100 мкм.

Как следует из рис. 1, для порошка АКВ-2.5 различного гранулометрического состава кривые практически совпадают начиная от значения относительной плотности 0,74.

Для разработки расчетно-экспериментальной методики определения реологических характеристи-

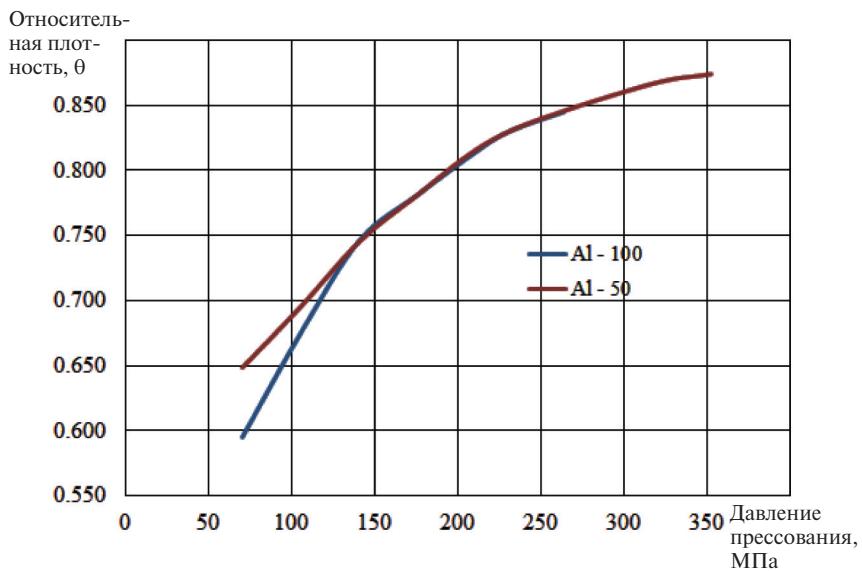


Рис. 1. Кривые уплотнения порошков с частицами различного размера и формы

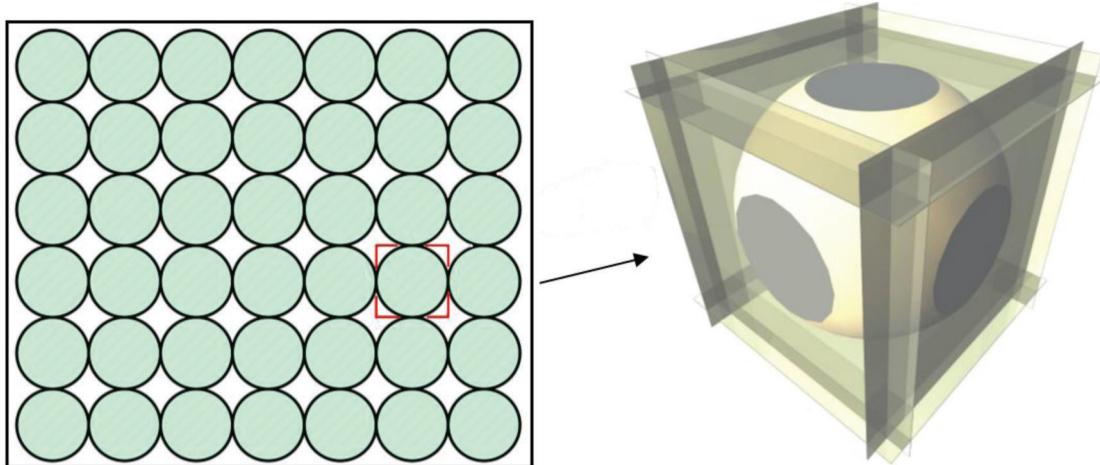


Рис. 2. Модель порошкового тела и его представительная элементарная ячейка

стик порошкового материала рассмотрим идеализированную модель порошкового тела, состоящего из сферических частиц одинакового размера. При приложении нагрузки уплотнение такого тела в замкнутом объеме осуществляется за счет пластической деформации материала частиц.

Математическое моделирование процесса уплотнения порошкового тела

Математическое моделирование при анализе процесса деформации элементарной ячейки

осуществлялось в коммерческом программном пакете ABAQUS версии 16.4 [12]. В качестве элементарной ячейки выбран кубик с частицей сферической формы, окруженной многогранной порой. При решении данной задачи был реализован неявный метод (implicit) в трехмерной постановке. На рис. 2 показана модель порошкового тела и его представительная элементарная ячейка.

Построенная конечно-элементная модель элементарной ячейки содержит 8310 элементов

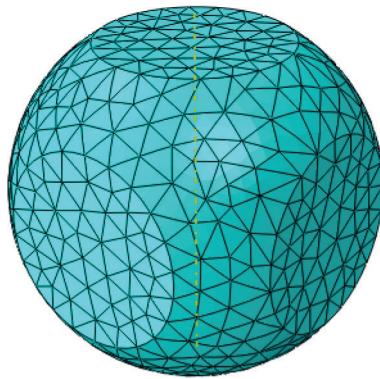


Рис. 3. Конечно-элементная модель элементарной ячейки

типа C3D10 и 12283 узлов. Условия гидростатического нагружения моделировались заданием граничных условий в перемещениях: элементарная ячейка равномерно сжимается абсолютно жесткими поверхностями до определенного перемещения с трех сторон с постоянной скоростью 3 мм/с. Контактное трение при деформации ячейки не учитывалось. На рис. 3 показана конечно-элементная модель элементарной ячейки.

Для построения кривых предельного состояния порошковых материалов использовано условие текучести, заданное лемнискатой. Возможность представления условия текучести в виде поверхности вращения лемнискаты показана в работе [10]. Уравнение

$$T^2 = - \left((\sigma_0 - q_s)^2 + \frac{(p_s + q_s)^2}{2} \right) + \sqrt{2(p_s + q_s)^2(\sigma_0 - q_s)^2 + \frac{(p_s + q_s)^4}{4}}, \quad (1)$$

где T – интенсивность касательных напряжений; p_s , q_s – пределы текучести соответственно при

гидростатическом сжатии и растяжении; σ_0 – среднее напряжение) представляет собой условие текучести, заданное лемнискатой, а на рис. 4 показана геометрическая интерпретация поверхности текучести на плоскости $T-\sigma_0$

При такой интерпретации предел уплотнения c и пластический сдвиг τ_s могут быть вычислены путем исследования уравнения (1) на экстремум. Результаты исследования представлены уравнениями (2) и (3):

$$c = p_s \sqrt{\frac{3}{8}}; \quad (2)$$

$$\tau_s = \frac{p_s}{\sqrt{8}}. \quad (3)$$

Следует отметить, что при расчете τ_s по формуле (3) должно выполняться неравенство $(\tau_s \leq \tau_s^{\text{комп}})$, где $\tau_s^{\text{комп}}$ – предел текучести компактного материала при чистом сдвиге. Для криевой текучести, заданной лемнискатой, это неравенство корректно выполняется при относительных плотностях не более 0,9, так как p_s , существенно возрастающая, увеличивает предел уплотнения c и пластический сдвиг τ_s . Поэтому при моделировании был рассмотрен интервал относительных плотностей от 0,74 до 0,9.

Результаты математического моделирования гидростатического сжатия представительной ячейки порошкового материала

Стадии развития пластических деформаций на примере представительной ячейки с плотностью 0,74 показаны на рис. 5. На рис. 6 представлены зависимости предела текучести при гидростатическом сжатии от относительной плотности порошкового тела.

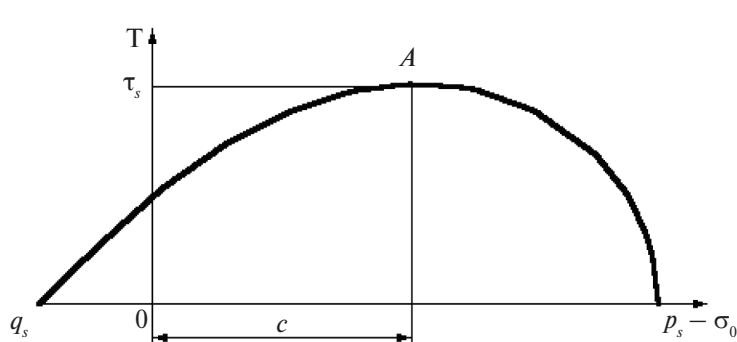


Рис. 4. Кривая текучести, заданная лемнискатой

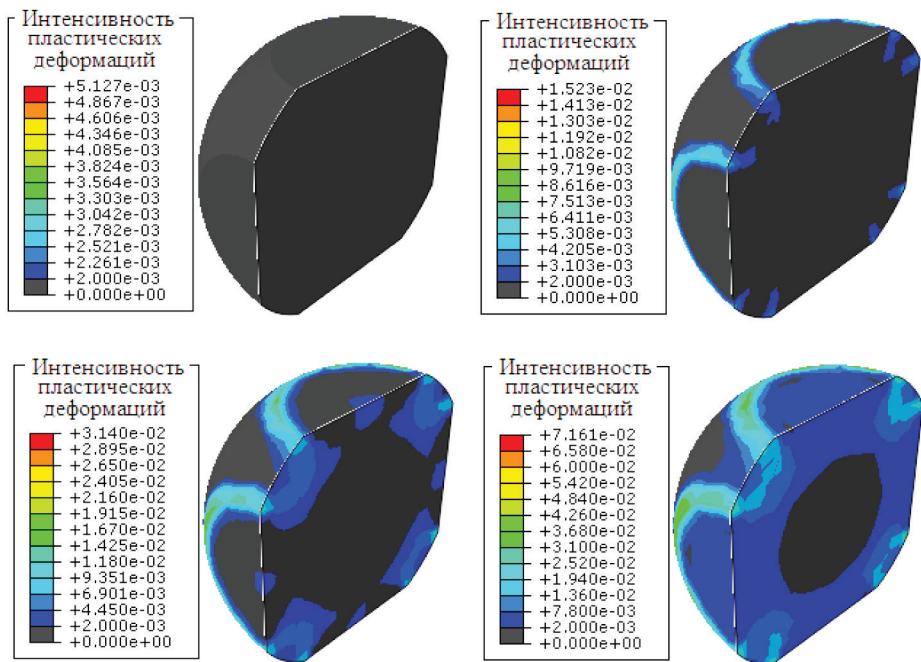


Рис. 5. Стадии развития пластических деформаций в представительной ячейке при гидростатическом сжатии (упругая область – темная)

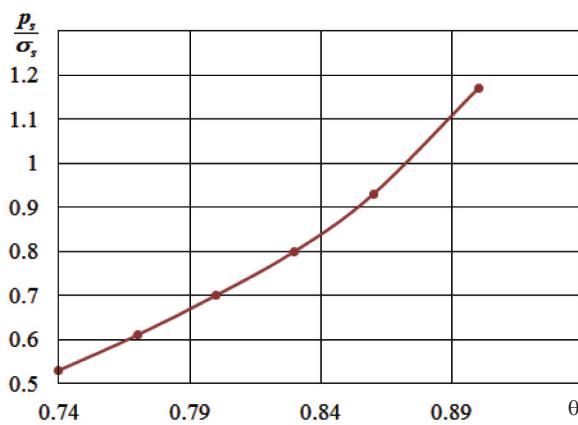


Рис. 6. Зависимость предела текучести при гидростатическом сжатии p_s от относительной плотности θ

Зная предел текучести порошковых материалов при гидростатическом сжатии p_s для различных плотностей, можно построить кривые предельного состояния порошкового материала в виде лемнискаты. Для упрощения модели при рассмотрении процессов сжатия построение лемнискаты выполнено из начала координат вследствие незначительного сопротивления рас-

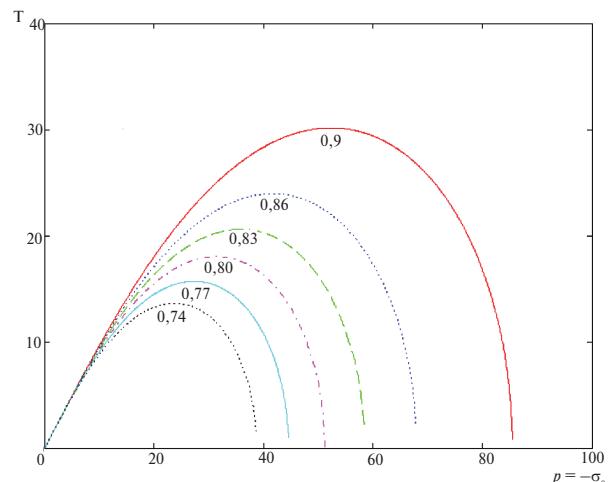


Рис. 7. Кривые предельного состояния порошкового материала при разных плотностях

тяжению порошкового тела. На рис. 7 представлены кривые предельного состояния исследованного порошкового материала при разных плотностях на плоскости $p-T$.

В работе [13] было показано, что процесс деформирования порошковых и пористых материалов можно исследовать с использованием



программного пакета ABAQUS и встроенной в него реологической модели Друкара–Прагера, которая предназначена для описания упруго-пластического поведения материалов. Для определения ее параметров, кроме сведений о пределе текучести и условиях перехода материала в пластическое состояние, необходимо иметь информацию и об упругих характеристиках порошкового тела [12].

В теории упругости для описания напряженно-деформированного состояния используются модуль нормальной упругости E , коэффициент Пуассона ν , модуль объемной деформации K и модуль сдвига G . Определим модуль объемной деформации K из условий гидростатического сжатия, а модуль нормальной упругости E и коэффициент Пуассона – из условий одноосного сжатия. Для определения упругих характеристик была использована та же модель представительного элемента из компактного материала: кубик с частицей сферической формы окруженной многогранной порой.

Результаты численных экспериментов при гидростатическом и одноосном сжатии представлены на рис. 8 *a*, *б*. Для процесса гидростатического сжатия: интенсивность касательных напряжений $T = 0$; гидростатическое давление $\sigma_0 = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$; а для процесса одноосного сжатия $T = \frac{\sigma_z}{\sqrt{3}}$; $\sigma_0 = \frac{\sigma_z}{3}$.

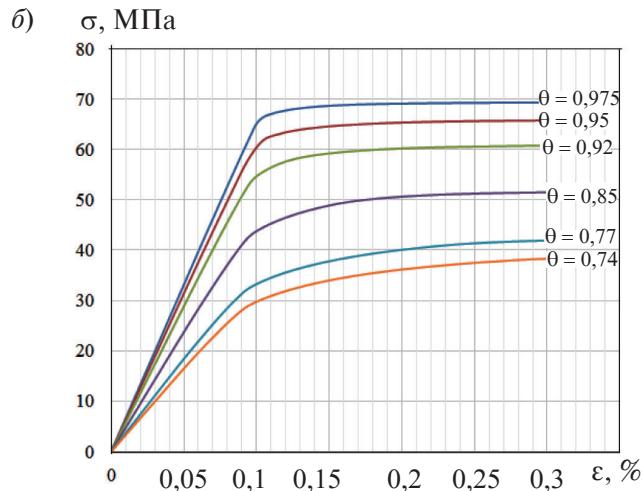
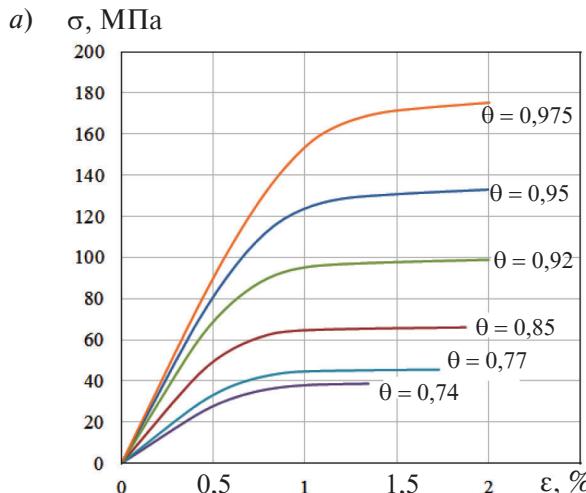


Рис. 8. Кривые нагружения представительной ячейки различной плотности θ : *а*) при гидростатическом сжатии; *б*) при одноосном сжатии

В области упругой деформации (линейный участок на рис. 8 *а*, *б*) выполняется закон Гука:

$\sigma_0 = K\epsilon_0$; $\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}$, где $\epsilon_0 = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$ – объемная деформация; K – модуль объемной деформации, МПа; E – модуль упругости, МПа; σ_z , ϵ_z – приложенное напряжение и относительная деформация вдоль оси z при одноосном сжатии.

Используя зависимости приложенного напряжения σ от относительной деформации ϵ , представленные на рис. 8, можно вычислить модуль объемной деформации K и модуль упругости E для порошковых материалов различной плотности.

Коэффициент Пуассона ν и модуль сдвига G рассчитываем по формулам [2]

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

Зависимости параметров упругих характеристик порошкового материала от пористости Π представлены в виде графиков на рис. 9

Полученные зависимости механических характеристик порошкового материала от плотности использованы для определения параметров модели Друкара–Прагера и проведения математического моделирования процесса прессования порошкового материала в закрытой матрице.

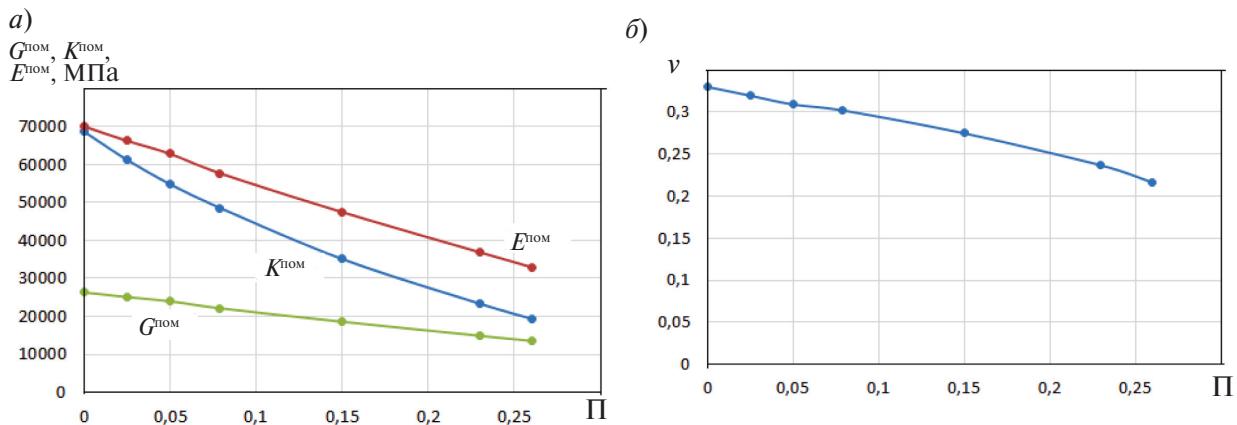


Рис. 9. Зависимости упругих характеристик порошкового материала от пористости

Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментов процесса прессования в закрытой матрице

Математическое моделирование процесса прессования проводилось с использованием программного пакета ABAQUS и встроенной в него модели материала «DRUCKER-PRAGER» с подпрограммой, разработанной авторами [13]. В табл. 2 указаны идентификационные параметры модели текучести, использованные для задания свойств материалов при моделировании процесса прессования порошка АКВ-2.5 в закрытой матрице. Задача решалась в трехмерной постановке.

Параметры реологической модели Друкера–Прагера

Относительная плотность ρ	P_a , МПа	P_b , МПа	d , МПа	β , градус	m , МПа
0,74	23,69	38,69	0	59,6	15,10
0,77	27,27	44,53	0	59,6	17,26
0,80	31,29	51,10	0	59,6	19,81
0,83	35,76	58,4	0	59,6	22,64
0,86	41,57	67,89	0	59,6	26,31
0,90	52,30	85,41	0	59,6	33,11

На рис. 10 показано осевое сечение цилиндрической прессовки из порошка АКВ-2.5.

Зависимость относительной плотности цилиндрической заготовки от давления прессования представлена на рис. 11.

Как видно из графика (см. рис. 11), результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Отклонение значений, полученных при моделировании, от

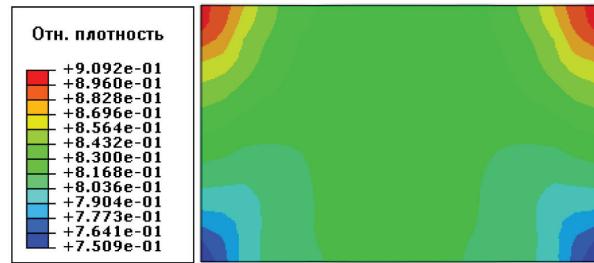


Рис. 10. Распределение относительной плотности в осевом сечении цилиндрической прессовки из порошка АКВ-2.5

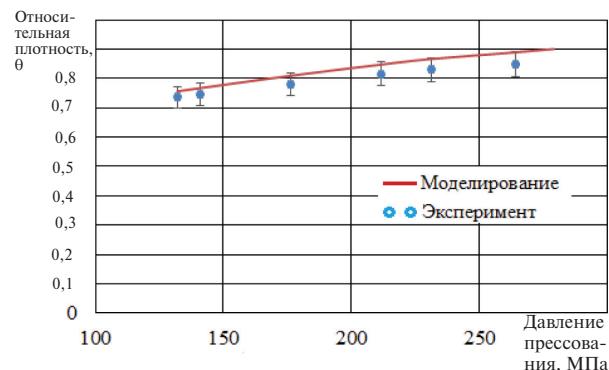


Рис. 11. Зависимость относительной плотности цилиндрической заготовки из порошка АКВ-2.5 от давления прессования

значений, найденных экспериментально, не превышает 6%.

Заключение

В результате исследования разработана расчетно-экспериментальная методика определе-



ния реологических характеристик порошкового материала.

Рассмотрена идеализированная модель порошкового тела, с помощью которой осуществлено математическое моделирование процесса деформации элементарной ячейки в виде кубика со сферической частицей, окруженной многоугранной порой. На основе результатов моделирования деформации элементарной ячейки при гидростатическом нагружении построена кривая предельного состояния порошкового тела, заданная лемнискатой. При такой интерпретации предел уплотнения и предел текучести при пластическом сдвиге могут быть вычислены путем исследования уравнения лемнискаты на экстремум. Для порошкового материала АКБ-2.5 построены кривые предельного состояния в интервале относительных плотностей от 0,74 до 0,9.

По результатам численных экспериментов для порошкового материала АКБ-2.5 модуль

объемной деформации определен из условий гидростатического сжатия элементарной ячейки, а модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона – из условия ее одноосного сжатия.

Полученные механические характеристики порошкового материала АКБ-2.5 использованы для математического моделирования процесса прессования с помощью пакета программ ABAQUS. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными по прессованию порошкового материала АКБ-2.5 в замкнутой матрице. Это свидетельствует о практической возможности применять разработанную расчетно-экспериментальную методику определения реологических характеристик порошкового тела по известным значениям предела текучести материала частиц для математического моделирования процессов уплотнения порошковых материалов.

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. // 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. // 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. // 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. // 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. // 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 гетеро-фазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения. // Наукоемкие 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. // 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. // 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. СПб.: Наука, 2012. 415 с.
11. Рыбин Ю.И., Цеменко В.Н. Предельное состояние уплотняемых порошковых сред. Обработка сплошных и слоистых материалов: Межвузовский международный сборник научных трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2003. С. 74–80.
12. Abaqus Analysis User's Guide. Volume 3: Materials. Abaqus 6.14.
13. Фук Д.В., Ганин С.В., Цеменко В.Н. Моделирование и исследование процесса уплотнения порошковых материалов с использованием программного пакета 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.: Izd-vo 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 protsessa 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 metallicheskikh 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 protsessa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennyu poroshkovuyu sredu [Research of process of consolidation at ultrasonic impact on the humidified powder medium]. *Nauchno-tehnicheskiye 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. **Rybin Yu.I., Tsemenko V.N.** Predelnoye sostoyaniye uplotnyayemykh poroshkovykh sred. Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov: Mezhvuzovskiy mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov [Limit condition of the condensed powder mediums. Magnitogorsk: MGTU, 2003. S. 74–80. (rus.)
12. Abaqus Analysis User's Guide. Volume 3: Materials. Abaqus 6.14.
13. **Fuk D.V., Ganin S.V., Tsemenko V.N.** Modelirovaniye i issledovaniye protsessa uplotneniya poroshkovykh materialov s ispolzovaniyem programmnogo paketa ABAQUS [Modeling and research of process of consolidation of powder materials with use of a software package of ABAQUS]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2016. № 1(238). S. 100–110. DOI 10.5862/JEST.238.10.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ЦЕМЕНКО Валерий Николаевич – доктор технических наук профессор, 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 Politehnicheskaya 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 Politehnicheskaya 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 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: S.V.Ganin@gmail.com