

DOI 10.5862/JEST/4

УДК 621.762

Д.В. Фук, В.Н. Цеменко, С.В. Ганин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАДКИ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА В ОБОЛОЧКЕ

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

MODELLING THE DEPOSITION PROCESS OF POWDER MATERIAL IN A CAPSULE

Проведен сравнительный анализ результатов моделирования в пакетах DEFORM и LS-DYNA процесса осадки алюминиевых образцов в капсуле с экспериментальными данными. Качественная картина и величина деформации, полученные при моделировании, практически совпадают с результатами экспериментальных исследований. Таким образом, можно говорить об адекватности разработанных компьютерных моделей и возможности их использования при моделировании процессов осадки, а также более сложных процессов деформирования, в которых относительная плотность изменяется несущественно. Для более сложных процессов деформирования заготовок из порошковых материалов (экструзия, равноканальное угловое прессование, прокатка), при которых интервал изменения плотности лежит в существенно более широком диапазоне, необходимо использовать адаптированные к этим условиям математические модели и условия текучести, в частности эллиптическое условие текучести, в котором используются две механические характеристики – предел текучести при сдвиге и предел текучести при гидростатическом сжатии.

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; ДЕФОРМАЦИЯ; АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ; ОСАДКА В КАПСУЛЕ.

Results of the comparative analysis of modeling in DEFORM and LS-DYNA of process rainfall of aluminum samples are given in a capsule packages with experimental data. The qualitative picture and size of deformation received when modeling practically coincide with results of pilot studies. Thus, it is possible to tell about adequacy of the developed computer models and possibility of their use when modeling processes rainfall, and also more difficult processes of deformation in which relative density changes insignificantly. For more difficult processes of deformation of preparations of powder materials (extrusion, equal-channel angular pressing, rolling) at which the interval of change of density lies in significantly wider range, it is necessary to use the mathematical models and conditions of fluidity adapted for these conditions, in particular an elliptic condition of fluidity in which two mechanical characteristics are used: a fluidity limit at shift and a fluidity limit at hydrostatic compression.

POWDER METALLURGY; MODELING; DEFORMATION; ALUMINUM ALLOYS; A DEPOSIT IN A CAPSULE.

Введение

Разработка новых технологий порошковой металлургии позволяет шире использовать ее возможности по созданию материалов с повышенными эксплуатационными свойствами [1–6]. Большое значение при этом имеют теоретический анализ и моделирование технологических процессов.

Теоретическое исследование обработки давлением металлических материалов и ряда других процессов, сопровождающихся значительной пластической деформацией и разрушением материалов, во многих случаях возможно с помощью численных методов, в частности методом конечных элементов (МКЭ). На основе МКЭ

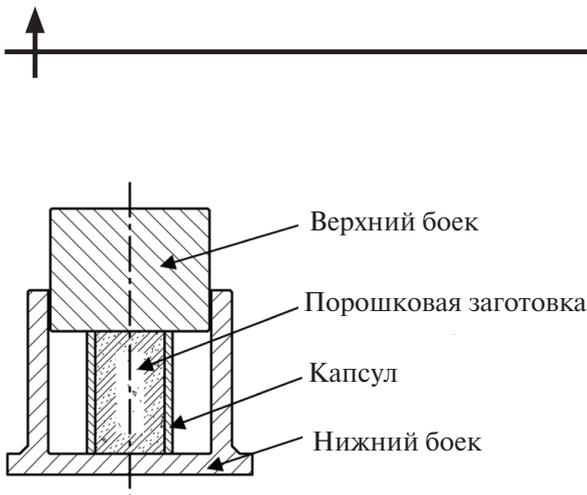


Рис. 1. Схема процесса осадки в капсуле

уже создано большое количество систем инженерного анализа [7]. Возможности этих программных продуктов существенно различаются, что необходимо учитывать, выбирая подход к решению конкретных задач, в частности сложных задач описания поведения порошковых и пористых материалов в процессах нагружения.

Порошковые и пористые материалы, в отличие от компактных, деформируются с необратимым изменением объема, при этом увеличение плотности может происходить за счет уменьшения объема пор. Описание деформации некомпактных металлических материалов возможно с тех же позиций теории пластического течения, с которых выполняется моделирование процессов обработки давлением компактных материалов. Для этого необходимо корректно сформулировать условие предельного состояния некомпактных материалов, т. е. построить поверхность текучести и получить уравнение ассоциированного закона пластического течения, связывающее параметры напряженного и деформированного состояний [8].

Из анализа различных публикаций следует, что большинство систем инженерного анализа либо не позволяют работать с некомпактными материалами, либо не могут дать надежный ответ на процесс уплотнения. Для выбора системы, наиболее адекватно описывающей поведение порошковых и пористых материалов при деформировании, рассмотрим наиболее функциональные и известные системы, нашедшие широкое применение в Российской Федерации: ANSYS/LS-DYNA версии 15.0 и DEFORM версии 10.0.1. Для простоты исследуем модель процесса осадки порошкового материала в капсуле (рис. 1).

Цель работы – сравнение результатов моделирования в пакетах DEFORM и ANSYS/LS-DYNA и экспериментального исследования процесса осадки порошкового материала в капсуле при повышенной температуре и разработка рекомендаций для моделирования процессов деформирования при более сложных технологических схемах нагружения.

Материалы, объекты моделирования и исследования

Материал капсулы – сплав АМг5: модуль упругости – $E = 70000$ МПа; предел текучести – 200 МПа – был задан в табличном виде в зависимости от температуры, деформации и скорости деформации; коэффициент Пуассона – 0,3.

Порошковая заготовка изготавливалась из алюминиевого порошка ПА-04 оптимизированного гранулометрического состава и имела начальную относительную плотность 0,65.

Геометрические размеры капсулы, толщины стенок, начальная плотность порошковой заготовки выбраны из условий проведения последующего моделирования и исследования процесса горячей экструзии композиционных материалов на основе алюминиевых матриц.

Моделирование в DEFORM

Условия моделирования: модель порошковой заготовки – пористая среда (реологические характеристики пористого тела представлены на рис. 2); модель течения – жестко-пластическая, условие текучести – по Мизесу; бойки – абсолютно жесткие тела; температура порошкового материала в процессе сжатия постоянна и равна 300 °С; коэффициент трения между капсулой и бойками равен коэффициенту трения между порошковой заготовкой и бойками, принят равным 0,3.

Результаты моделирования осадки заготовки (начальные размеры: высота $H = 30$ мм; диаметр порошковой заготовки $D = 17$ мм)

При толщине стенки капсулы $b = 2$ мм образуется двойная бочка (рис. 3). На рис. 4 видны зоны разрыхления. Эти зоны разрыхления довольно большие, что вызывает разрушение заготовки. Следовательно, капсула толщиной стенки 2 мм не дает необходимый подпор для уплотнения; относительная деформация до разрушения составляет около 15 %.

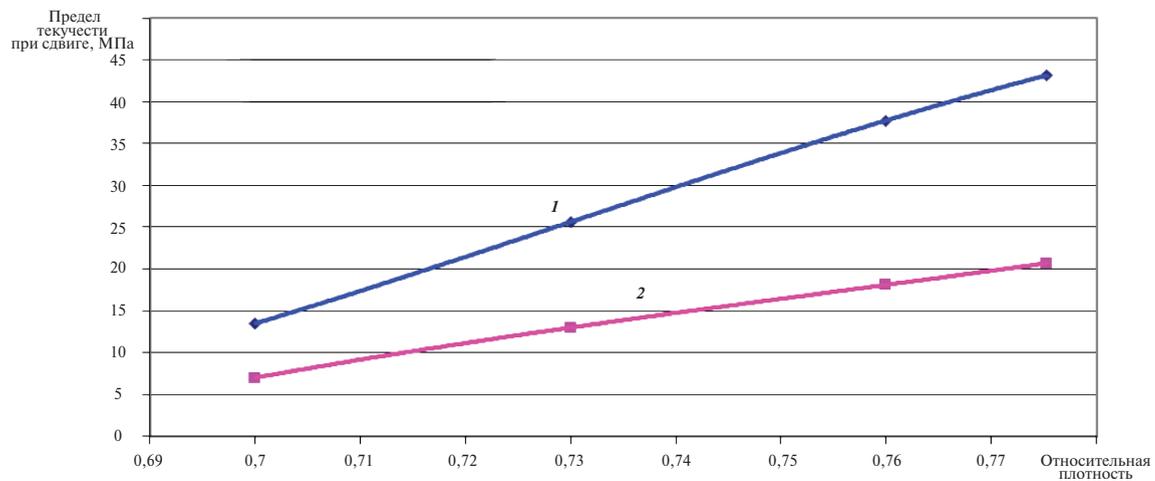


Рис. 2. Зависимость предела текучести при пластическом сдвиге от относительной плотности материала при 20 (1) и 300 (2) °С [9]

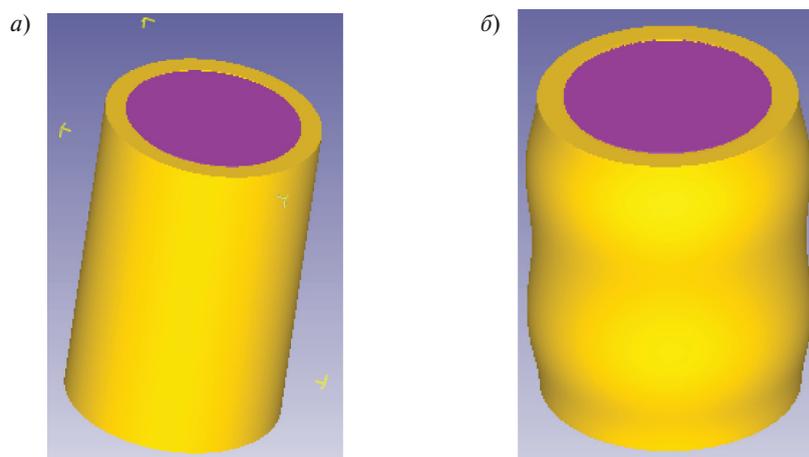


Рис. 3. Образец до (а) и после (б) деформации 15 %

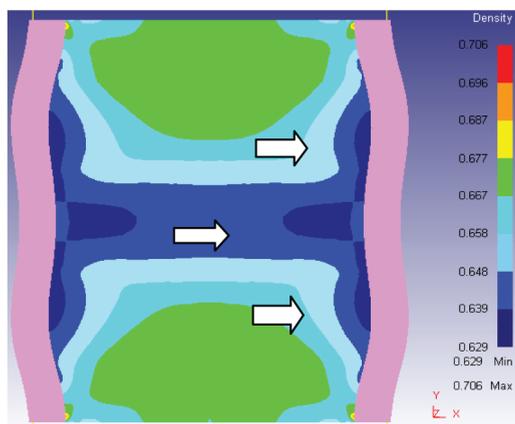


Рис. 4. Распределение относительной плотности при деформации 15 %

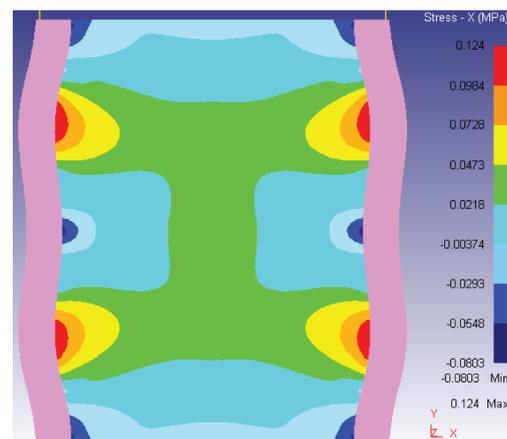


Рис. 5. Распределение радиальных напряжений при деформации 15 %

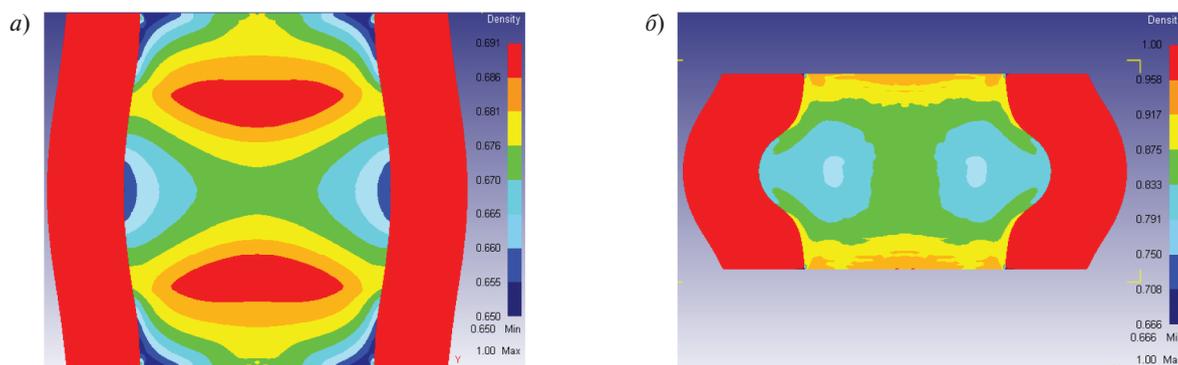


Рис. 6. Распределение плотности порошковой заготовки при деформации 16 (а) и 45 % (б)

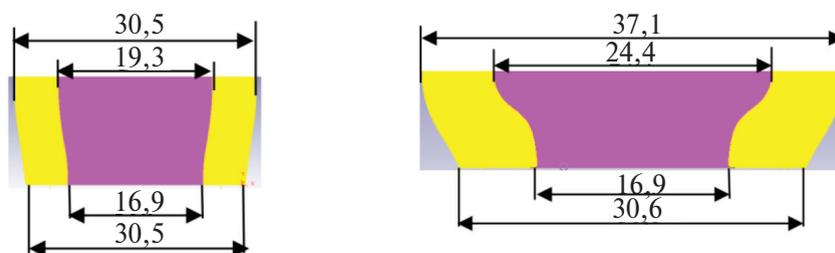


Рис. 7. Размеры образцов после деформации 16 (а) и 45 (б) %

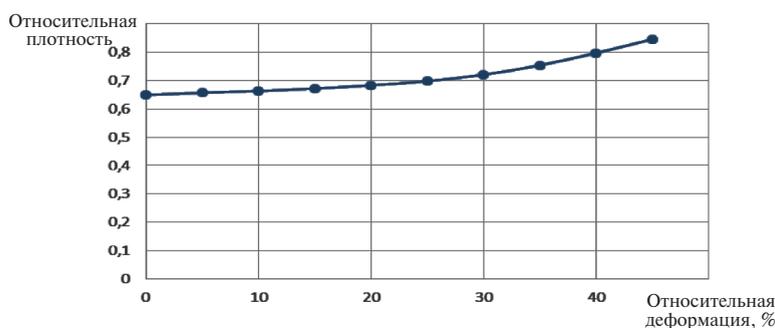


Рис. 8. Изменение плотности порошковой заготовки в зависимости от относительной деформации

При толщине капсулы $b = 5$ мм сначала наблюдается разрыхление порошковой заготовки у торцов и вблизи бочки (рис. 6, а), затем зона разрыхления исчезает и порошковая заготовка доуплотняется (рис. 6, б). Это происходит под действием подпора со стороны пластически деформируемой оболочки.

На рис. 7 показаны заготовки после относительной деформации 16 и 45 %. Следов разрушения не обнаружено.

На рис. 8 показано изменение относительной плотности порошковой заготовки в процессе осадки. Относительная плотность порошковой заготовки после деформации 16 % составляет 0,67, а после 45 % равна 0,84. Таким образом, под действием пластической деформации оболочки произошло уплотнение заготовки за счет дополнительного воздействия гидростатической составляющей тензора напряжений в порошковой заготовке.

Моделирование в пакете ANSYS/LS-DYNA

При решении данной задачи был реализован явный метод в осесимметричной постановке. В этом случае в модели приняты следующие допущения: рассматривалась двухмерная осесимметричная постановка задачи; в исходном состоянии порошковая заготовка считалась однородной и имела постоянную плотность; коэффициент трения на всей поверхности контакта одинаков – 0,3; не учитывались термодинамические эффекты.

Характеристики порошкового материала были адаптированы к модели в пакете LS-DYNA-Geologic cap: условие текучести порошкового материала задавалось в форме, представленной на рис. 9, а материал капсулы был представлен как LS-DYNA bilinear kinematic [10].

Поскольку пакет LS-DYNA не выполняет расчет распределения плотности в материале заготовки, то для ее оценки использовалась формула [11]

$$\rho = \rho_0 e^{\varepsilon_v^p}, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала после деформации; ρ_0 – начальная плотность заготовки; ε_v^p – эффективная пластическая деформация.

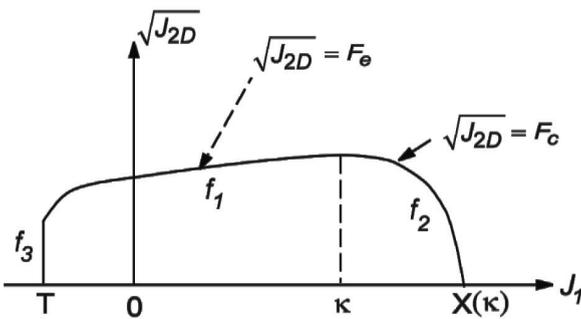


Рис. 9. Геометрическая интерпретация условия текучести на плоскости двух инвариантов модели Geologic cap

Результаты моделирования осадки заготовки (начальные размеры: высота $H = 30$ мм; диаметр порошковой заготовки $D = 17$ мм).

При толщине капсулы $b = 2$ мм, как следует из рис. 10, образуется двойная бочка. Расчетная относительная плотность заготовки при деформации 15 % практически не изменяется. Радиальное напряжение у бочек – растягивающее, что, возможно, вызывает разрыхление. Однако модель явно не показывает разрушения заготовки. Таким образом, капсула толщиной 2 мм не дает необходимого подпора для уплотнения.

При толщине капсулы $b = 5$ мм результаты получены следующие: на рис. 11 и 12 представлены распределения напряжений и деформаций и изменение геометрических размеров заготовок при деформации 16 и 45 %. Разрушение не ведет к нарушению сплошности заготовки. Расчетная относительная плотность заготовки находится в интервале от 0,65 до 0,69, т. е. изменяется в узком интервале. Таким образом, по этой модели подпор со стороны стенки толщиной 5 мм несущественно повышает гидростатическую составляющую тензора напряжений.

Для сравнения результатов моделирования осадки заготовки в капсуле проведено моделирование в пакетах DEFORM и ANSYS/LS-DYNA процесса осадки заготовки с относительной плотностью 0,65 без капсулы при комнатной температуре 20 °С и при температуре 300 °С. Диаметр заготовки – $D = 17$ мм, высота – $h = 15$ мм. Возможности пакета DEFORM не позволили адекватно смоделировать разрушение порошковой заготовки при одноосном сжатии при заданных условиях. Результаты моделирования в пакете LS-DYNA представлены на рис. 13 и 14.

При комнатной температуре порошковая заготовка с относительной плотностью 0,65 разру-

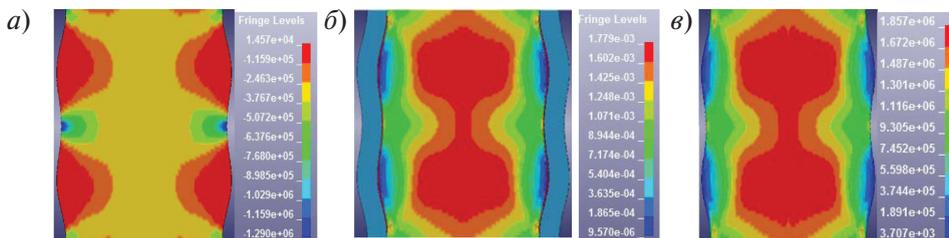


Рис. 10. Распределение радиальных напряжений (а) и эффективная пластическая деформация (б, в) при деформации 15 %

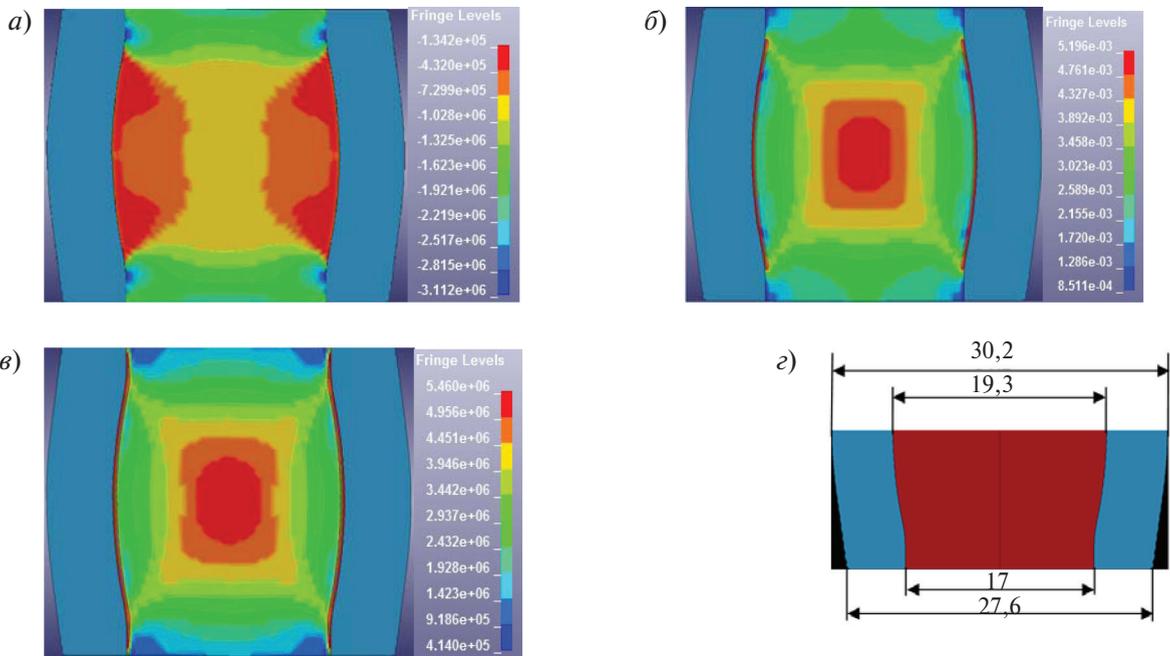


Рис. 11. Распределение радиальных напряжений (а); эффективная пластическая деформация (б); интенсивность напряжений (в) и размеры заготовки (г) при деформации 16 %

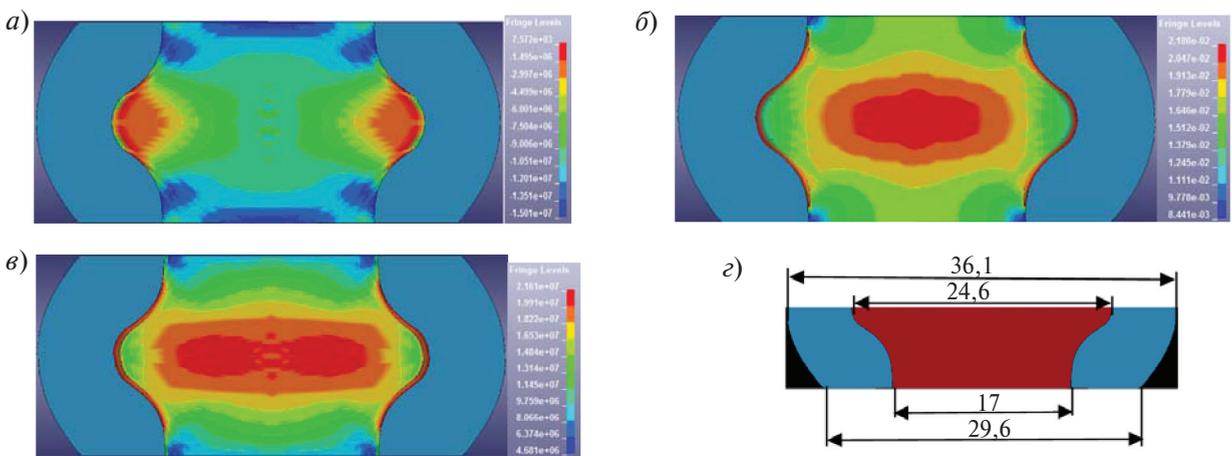


Рис. 12. Распределение радиальных напряжений (а); эффективная пластическая деформация (б); интенсивности напряжений (в) и размеры заготовок (г) при деформации 45 %

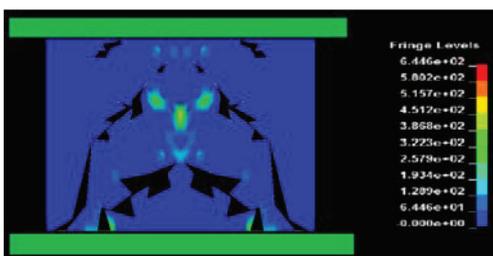


Рис. 13. Разрушение порошковой заготовки после нагружения при 20 °С

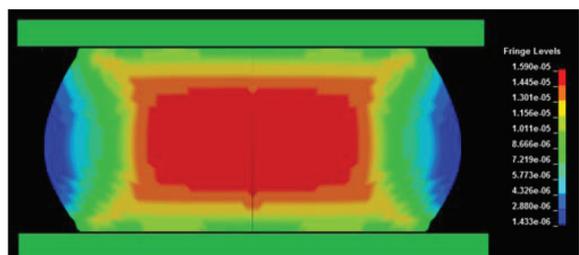


Рис. 14. Распределение объемной пластической деформации при деформации 34 %

шается хрупко практически сразу после нагружения. Пластическая деформация заготовки равна 0.

При температуре 300 °С порошковый материал более пластичен, поэтому испытуемый образец пластически деформируется, образуя бочку, до деформации 34 %, после этого он разрушается. Вследствие отсутствия подпора со стороны боковой стенки плотность заготовки до разрушения практически не меняется.

Результаты экспериментов

Для проверки адекватности работы систем инженерного анализа их результаты сопоставлены с данными проведенных экспериментов по осадке порошковой заготовки в капсуле. Экспериментальные данные представлены на рис. 15–17.

При толщине стенки капсулы $b = 2$ мм. внешний характер деформации соответствует результатам математического моделирования, что практически подтверждает образование двойной бочки; увеличение деформации более 15 % при-

водит к разрыхлению порошковой заготовки и разрушению оболочки.

При толщине стенки капсулы $d = 5$ мм макроструктура образцов после осадки с относительной деформацией 16 и 45 представлена на рис. 16. Разрушение заготовок не наблюдается.

Для определения относительной плотности порошковой заготовки после осадки стандартными методиками шлифподготовки были полу-

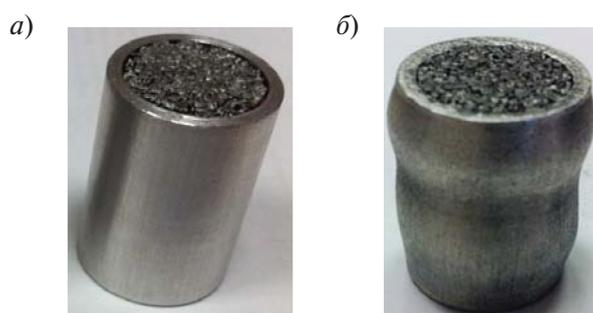


Рис. 15. Общий вид образцов до деформации (а) и после деформации 15 % (б)

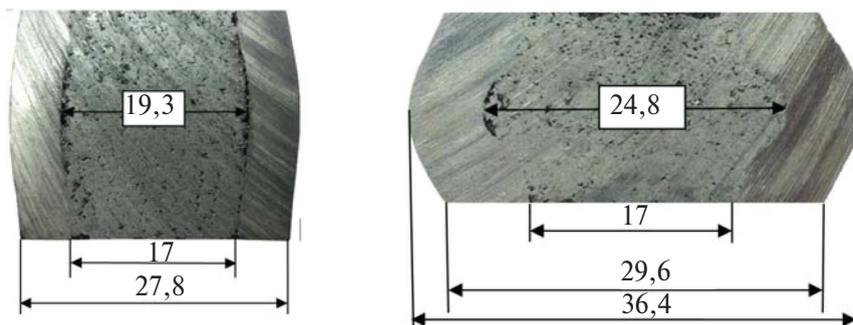


Рис. 16. Макроструктура образцов после сжатия 16 % (а) и 45% (б)



Рис. 17. Макроструктура порошковой заготовки после деформации 45 % (пористость: 1 – 0,259; 2 – 0,201; 3 – 0,234; 4 – 0,287; 5 – 0,226; 6 – 0,268; 7 – 0,262; 8 – 0,340; 9 – 0,247)

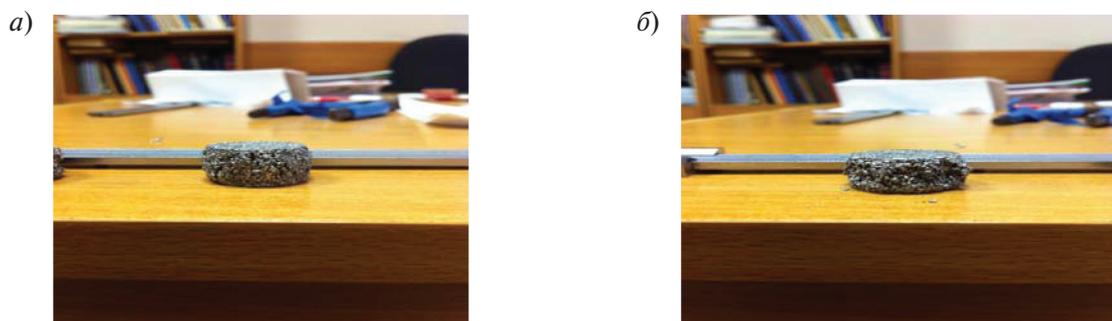


Рис. 15. Порошковая заготовка после деформации 20 % (а) и предельной деформации 30 % (б)

чены макрошлифы, анализ которых проводился с помощью программного обеспечения Видео-Тест 5.2. Это позволило оценить пористость и относительную плотность образцов (рис. 17).

Как показал эксперимент, средняя относительная плотность заготовки после деформации 45 % составила 0,74. Следовательно, в процессе осадки подпор пластически деформируемой оболочки уплотнил порошковую заготовку от 0,65 до 0,74.

При осадке без оболочки и температуре 300 °С порошковая заготовка деформируется пластически до 30 %, образует бочку (рис. 18). После этого она теряет устойчивость и разрушается.

Выводы и практические рекомендации

Сравнение результатов моделирования в DEFORM и LS-DYNA процесса осадки алюминиевых образцов в капсуле с экспериментальными данными показало, что обе модели позволяют получить адекватные результаты. Качественная картина и величина деформации, полученные при моделировании, практически совпадают с результатами экспериментальных исследований. Различие по плотности между экспериментом и моделированием составляет

8,5 % (для модели LS-DYNA) и 12 % (для модели DEFORM). При этом следует отметить, что в первом случае расчетное значение плотности (0,69) менее полученного экспериментально, а во втором случае (0,84) существенно превышает экспериментальные значения. Это, видимо, связано с особенностями математических моделей материалов и условиями их текучести.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об адекватности разработанных компьютерных моделей и возможности их использования при моделировании процессов осадки, а также более сложных процессов деформирования, в которых относительная плотность изменяется незначительно. Для более сложных процессов деформирования заготовок из порошковых материалов (экструзия, равноканальное угловое прессование, прокатка), при которых интервал изменения плотности лежит в существенно более широком диапазоне, необходимо использовать адаптированные к этим условиям математические модели и условия текучести, в частности эллиптическое условие текучести, в которое входят две механические характеристики – предел текучести при сдвиге и предел текучести при гидростатическом сжатии [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю. [и др]. Прессование гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода

интенсивного уплотнения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 5 (23). С. 13–20.

3. 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.

4. 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.

5. **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.

6. **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.

7. **Илюшкин М.В.** Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA. Ульяновск, 2012. 91 с.

8. **Цеменко В.Н.** Деформирование порошковых сред. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2001. 104 с.

9. **Рудской А.И., Цеменко В.Н., Ганин С.В.** Исследование процессов уплотнения и деформирования порошкового композиционного материала системы алюминий - редкоземельные элементы // Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Изд-во ООО «Фолиум», 2014. С. 25–31.

10. LS-DYNA Keyword user's manual. July 2006. Version 971.

11. **Selig S.G.** Finite element simulation of the compaction and spring back of an aluminum powder metallurgy alloy, Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Applied Science. / Dalhousie University Halifax, Nova Scotia, March 2012.

REFERENCES

1. **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*. 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)

2. **Rudskoy A.I., Kokorin V.N., Kondratyev S.Yu.** [i dr]. 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.

3. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N., Sizov N.A.** Issledovaniye protsessov uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu. [Research of process of consolidation at ultrasonic impact on the humidified powder environment]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. №3(178). S. 148–155. (rus.)

4. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.** Tekhnologiya posloynnogo 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.)

5. **Sokolov Yu.A., Kondratyev S.Yu., Lukyanov A.A.** Polucheniye izdeliy iz kompozitsionnykh materialov metodom elektronno-luchevogo sinteza i issledovaniye ikh svoystv. [Receiving products from composite materials by

method of electron beam synthesis and research of their properties]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2015. № 2. – S. 35–41. (rus.)

6. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.** Algoritm i tekhnologicheskiye protsessy sinteza poroshkovykh detaley elektronnyim 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.)

7. **Ilyushkin M.V.** Modelirovaniye protsessov obrabotki metallov davleniyem v programme ANSYS/LS-DYNA [Modeling of processing of metals pressure in the ANSYS/LS-DYNA program]. Ульяновск, 2012 г. 91 с.

8. **Tsemenko V.N.** Deformirovaniye poroshkovykh sred [Deformation of powder environments] СПб.: Изд-во SPbGPU, 2001. 104 с. (rus.)

9. **Rudskoy A.I., Tsemenko V.N., Ganin S.V.** Issledovaniye protsessov uplotneniya i deformirovaniya poroshkovogo kompozitsionnogo materiala sistemy alyuminiy - redkozemelnyye elementy [Research of processes of consolidation and deformation of powder composite material of system aluminum - rare-earth elements]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* М.: Изд-во: ООО «Фолиум», 2014. S. 25–31. (rus.)

10. LS-DYNA Keyword user's manual. July 2006. Version 971.

11. **Selig S.G.** Finite element simulation of the compaction and spring back of an aluminum powder metallurgy alloy, Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Applied Science / Dalhousie University Halifax, Nova Scotia, March 2012.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

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

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 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: plast-ftim@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