

DOI 10.5862/JEST.238.10

УДК 621.762

Д.В. Фук, С.В. Ганин, В.Н. Цеменко

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ПОРШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ABAQUS

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

STUDY OF THE CONSOLIDATION OF POWDER MATERIALS USING THE ABAQUS SOFTWARE PACKAGE

С использованием численных методов, в частности методом конечных элементов, выполнено исследование процессов пластической деформации металлических материалов. Проведена расчетно-экспериментальная адаптация реологической модели Друкера–Прагера, встроенной в программный пакет ABAQUS, для моделирования процессов деформирования порошковых материалов в широком диапазоне изменения плотности. Сравнение результатов моделирования процесса прессования в закрытой матрице, где относительная плотность порошкового тела изменяется в сравнительно широком диапазоне (0,65–0,98), с экспериментальными данными показало, что модель с использованием подпрограммы позволяет получить результаты, описывающие течение порошкового материала более точно, чем модель без подпрограммы. Показано, что программный пакет ABAQUS и встроенная в него модель Друкера–Прагера позволяют получить результаты более точные, чем при использовании программных пакетов DEFORM (со встроенной моделью POROUS) и ANSYS/LS-DYNA (с моделью CAP GEOLOGIC).
ПОРШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ; КОМПАКТИРОВАНИЕ; МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ; ПЛОТНОСТЬ.

The paper presents a study of the processes of plastic deformation of metallic materials using numerical methods, in particular, the finite element method. Computational and experimental adaptation of the rheological Druker-Prager model was performed, constructed in the ABAQUS software package for modeling deformation processes of powder materials in a wide range of change of density. The results of modeling the pressing process in a closed matrix, where the relative density of a powder body changes in a rather wide range (0.65-0.98), were compared with the experimental data, and showed that the model using a subprogram allows to obtain the results more precisely describing a current of powder material in comparison with the model without a subprogram. It is shown that the ABAQUS software package and Druker-Prager's model built in it allow to obtain more exact results than those obtained using the DEFORM (with the built-in POROUS model) and ANSYS/LS-DYNA (with the CAP GEOLOGIC model) software packages.

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

Введение

Для повышения эксплуатационных свойств деталей машин и конструкций, снижения себестоимости продукции промышленного производства необходимо создавать новые технологи-

ческие процессы получения материалов и готовых изделий из них. Одно из наиболее перспективных направлений развития материаловедения – порошковая металлургия. Уже разработаны и применяются различные методы

изготовления и компактирования порошков [1–8]. Это позволило значительно увеличить долю использования в промышленности изделий порошковой металлургии.

При компактировании металлических порошков различного фракционного и химического состава широко применяются различные виды пластической деформации. Теоретическое исследование процессов пластической деформации металлических материалов во многих случаях возможно численными методами, в частности методом конечных элементов (МКЭ) [9]. На основе МКЭ уже создано большое количество программных систем инженерного анализа: ABAQUS, ANSYS, LS-DYNA, DEFORM и т.д. В работе [9] использованы программные пакеты ANSYS/LS-DYNA и DEFORM для исследования процесса осадки порошков в металлической капсуле и подтверждены адекватность разработанных компьютерных моделей и возможности их использования при моделировании процессов осадки, а также 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 плотностей лежит в существенно более широких диапазонах, 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 [10].

Таким образом, актуальна проблема выбора программного пакета МКЭ и разработки адекватных компьютерных моделей порошковых и пористых материалов.

Цель нашей работы – расчетно-экспериментальная адаптация реологической модели Друкера–Прагера, встроенной в программный пакет ABAQUS, к моделированию процессов деформирования порошковых материалов в широком диапазоне изменения плотности.

Методики проведения исследований

Математическое моделирование производилось в коммерческом программном пакете ABAQUS версии 16.4. Был реализован явный

метод (explicit) в трехмерной постановке. Модель порошкового материала реализована в виде встроенной реологической модели Друкера–Прагера. Построенная конечно-элементная модель порошковой заготовки содержит 4732 элементов типа C3D8R и 5490 узлов.

В ходе данного моделирования приняты следующие основные допущения: инструменты (бойки, пуансон и матрица) – абсолютно жесткие тела; коэффициент трения на всей поверхности контакта одинаков и равен 0,3; термодинамические эффекты не учитывались. Условия нагружения моделировались заданием граничных условий в перемещениях, при этом нижний боек, матрица и нижний пуансон были зафиксированы в пространстве, а верхний боек и верхний пуансон перемещался только в осевом направлении с постоянной скоростью $v = 3$ мм/с.

В качестве материала для проведения исследований и экспериментов выбран порошок алюминевый марки ПА-4 (ГОСТ 6058-73). Реологические характеристики этого порошкового материала были определены на основе проведения испытаний на растяжение, одноосное сжатие и прессование в закрытой матрице образцов различной плотности. Методика определения этих характеристик подробно изложена в работе [10]. Экспериментальное исследование процесса осадки порошкового материала в капсуле производилось на испытательной машине Р-10 с применением специальной оснастки (рис. 1). Перед испытанием порошок запрессовывался в цилиндрическую капсулу с внутренним диаметром 16,5 мм. Капсулы для запрессовки порошка изготавливались из прутка АМг5 диаметром 30 мм. В исследовании применялись капсулы с толщиной стенки 2 или 5 мм. Оснастка с порошковой заготовкой помещалась в печь ПЛ

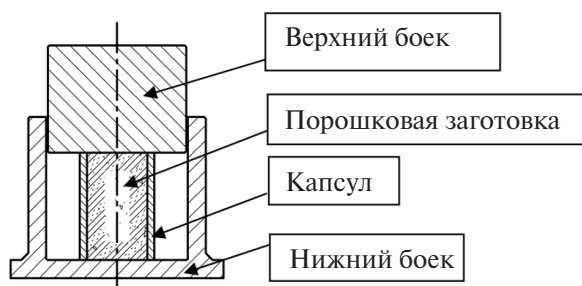


Рис. 1. Схема оснастки для осадки в капсуле

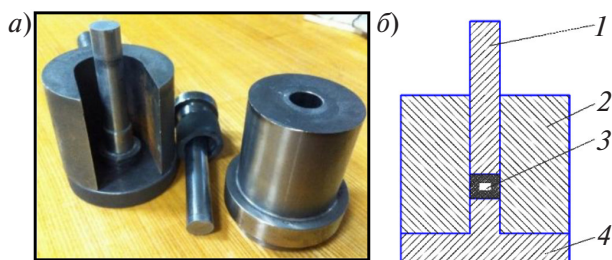


Рис. 2. Общий вид (а) и схема (б) пресс-оснастки для прессования металлических порошков: 1 – верхний пуансон; 2 – матрица; 3 – порошок; 4 – нижний пуансон

10/12,5, нагретую до температуры испытания, и выдерживалась 40 минут, после чего переносилась в рабочее пространство испытательной машины. На боковую поверхность верхнего бойка были нанесены метки, соответствующие различным степеням деформации образца; после достижения заданной степени деформации эксперимент останавливался.

После деформирования образцы разрезались по направлению оси симметрии и исследовались методами оптической микроскопии на микроскопе Carl Zeiss Axio Observer Dm1a.

Для сравнения результатов эксперимента с результатами математического моделирования были выбраны следующие параметры: давление прессования, при котором достигается заданная степень деформации; пористость в различных частях заготовки после деформации (выбрано 9 областей, в которых определялась пористость с применением стандартной методики «пористость» системы анализа видеоизображения ВидеоТест Структура 5.2); изменение геометрических размеров и формы капсулы.

При исследовании процесса прессования в закрытой матрице также использован порошок ПА-4. На рис. 2 показан общий вид оснастки и схема процесса.

Процесс прессования в закрытой матрице выполнен на прессе ПСУ-50. Порошковый материал засыпался в матрицу и прессовался при различных давлениях; после выпрессовки определялась пористость образцов в различных сечениях.

Особенности реологической модели Друкера–Прагера и метод ее калибровки

Различные модели, описывающие поведение уплотняемых материалов, приведены в работах [11–13]. Одна из наиболее популярных реологических моделей, позволяющая одновременно описывать процессы как уплотнения, так и разуплотнения (разрыхления) пластически уплотняемых материалов, – модель Друкера–Прагера. Она предназначена для упругопластических материалов с возможностью описания упрочнения.

В модели Друкера–Прагера условие текучести описывает три поверхности: предельную поверхность f_1 ; поверхность уплотнения f_2 и промежуточную (сглаживающую) поверхность f_3 . Поскольку сглаживающая поверхность f_3 мала и не относится к участку уплотнения, она не подлежит рассмотрению. На рис. 3 показана геометрическая интерпретация поверхности текучести Друкера–Прагера с двумя составляющими поверхностями в двумерной плоскости p – q (p – гидростатическое давление, q – интенсивность напряжений Мизеса).

Для определения предельной поверхности f_1 достаточно провести какие либо два из следующих трех испытаний (цилиндрических образцов): растяжение (точка 1 на рис. 3); срез (точка 2 на рис. 3); одноосное сжатие (точка 3 на рис. 3). Для определения поверхности уплотнения f_2 необходимо реализовать гидростатическое сжатие (точка 5 на рис. 3) или прессование в закрытой пресс-форме (точка 4 на рис. 3) [14, 15].

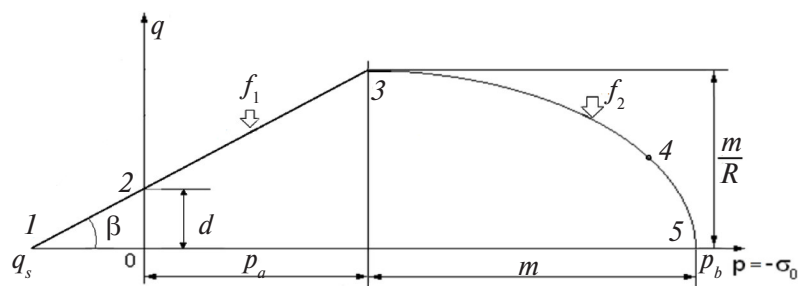


Рис. 3. Геометрическая интерпретация модели Друкера–Прагера в плоскости p – q

Предельная поверхность f_1 описывается уравнением

$$f_1 = q - p \operatorname{tg} \beta - d = 0,$$

где d – адгезия материалов, МПа; β – угол внутреннего трения материалов, град. При деформировании материалов значения d и β изменяются.

Поверхность уплотнения f_2 управляет уплотнением – упрочнением материалов при больших гидростатических давлениях сжатия. Она описывается уравнением

$$f_2 = \sqrt{(p - p_a)^2 + (Rq)^2} - m = 0,$$

где p_a , МПа, – предел уплотнения, определяющий начальное гидростатическое давление, под действием которого материал начинает уплотняться; R – параметр, характеризующий форму поверхности уплотнения; $m = R(d + p_a \operatorname{tg} \beta)$ – функция состояния материала; $p_b = p_a + m$ – предел текучести при всестороннем сжатии, МПа.

Для определения приращений пластической деформации $d\varepsilon_{ij}^p$ используется функция пластического потенциала $\Phi(\sigma_{ij})$. Уравнения пластического течения имеют вид

$$d\varepsilon_{ij} = d\lambda \partial \Phi / \partial \sigma_{ij},$$

где $d\lambda$ – неотрицательный неопределенный скалярный множитель [11]. Полагают, что функция пластичности f и пластический потенциал Φ совпадают, т.е. $f = \Phi$. При этом ассоциированный закон пластического течения выполняется, то есть

$$d\varepsilon_{ij}^p \approx d\varepsilon_{ij} = d\lambda \partial \Phi / \partial \sigma_{ij}. \quad (5)$$

Параметры упругости E и ν , поверхности текучести f и пластического потенциала Φ являются единственными для текущего уровня уплотнения (относительной плотности). Чтобы корректно моделировать деформирования уплотняемых материалов, необходимо определить все параметры, входящие в модели Друкера–Прагера (E , ν , d , β , R , p_a) при разных значениях относительной плотности. На рис. 4 показано семейство поверхностей текучести по Друкеру–Прагеру, полученное в результате испытаний алюминиевого порошка ПА-4. Подробнее методы калибровки параметров модели Друкера–Прагера рассмотрены в работе [15].

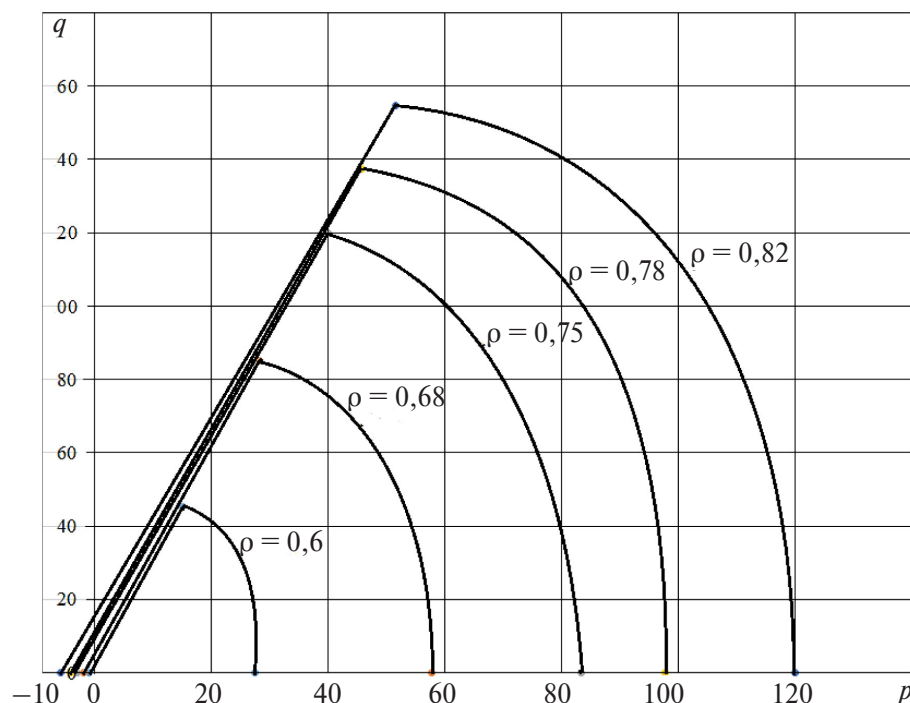


Рис. 4. Семейство поверхностей текучести по Друкеру–Прагеру, полученное на основе механических испытаний алюминиевого порошка ПА-4

Разработка подпрограммы к пакету ABAQUS для возможности изменять характеристики материала в расчете процесса уплотнения

Модель материала Друкера–Прагера реализуется в программном пакете ABAQUS. Пакет ABAQUS в стандартной постановке задачи использует только один набор параметров материала, соответствующих поверхности текучести материала при одной фиксированной плотности, т.е. этот пакет не может изменить параметры материалов в процессе деформирования [15].

Для расчета параметров модели Друкера–Прагера необходимо выбрать подходящую плотность материала. Это приближение допустимо в случаях, когда заранее известен интервал изменения плотности материала в процессе деформации. Для устранения такого недостатка разработана подпрограмма на языке программирования FORTRAN, позволяющая обновлять локальные параметры материалов в каждое приращение по

времени. Обновление этих параметров производится исходя из значений свойств материала на предыдущем шаге. Для очередного приращения времени Δt подпрограмма выдает текущее приращение деформации $d\varepsilon_{ij}$, рассчитывает локальную плотность в каждом элементе, а затем обновляет упругопластические свойства материала в соответствии с табличными данными, которые изначально вводятся при задании свойств материала. Таким образом, все параметры упругости и пластичности уплотняемых материалов автоматически обновляются на каждом шаге по времени. Принцип работы подпрограммы в виде блок-схемы представлен на рис. 5.

Для корректной работы пакета МКЭ с созданной подпрограммой требуется, чтобы пользователь имел определенное представление о параллельных вычислениях. Поскольку этот вопрос не касается поставленной цели, подробно в данной работе он не рассматривается.

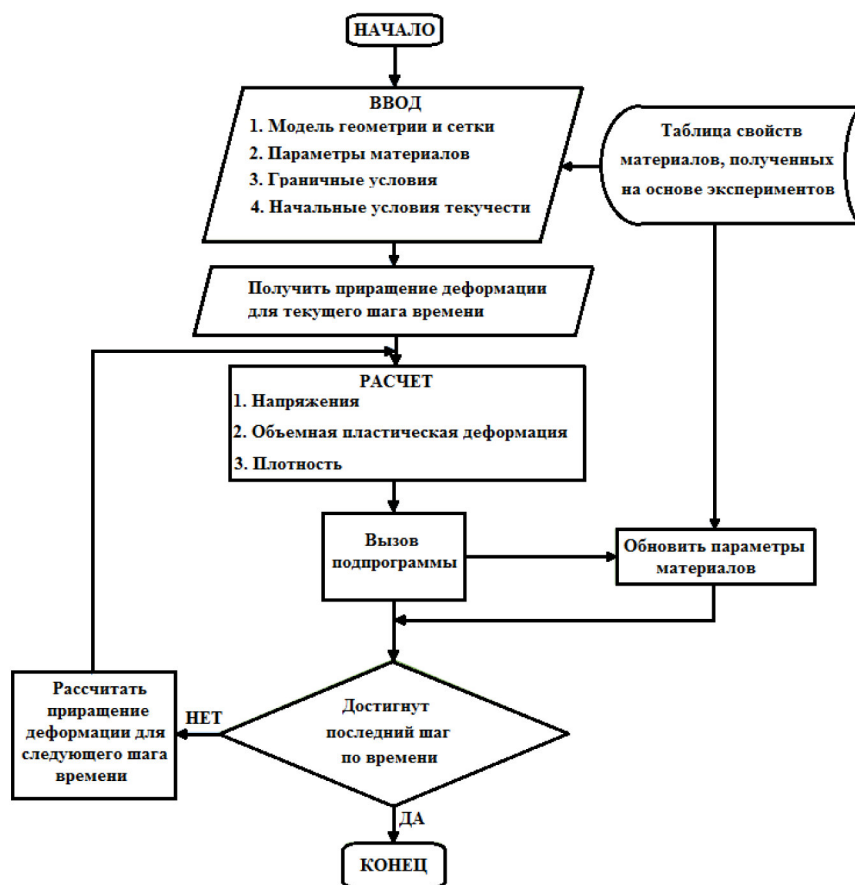


Рис. 5. Блок-схема работы подпрограммы

Анализ результатов моделирования процесса осадки в капсуле

Реологические характеристики образцов различной плотности из порошка ПА-4 определены экспериментально и представлены в таблице. На основе этих характеристик в соответствии с руководством по использованию программного продукта ABAQUS [15] были получены параметры модели Друкера–Прагера, экстраполированные на более широкий интервал изменения относительной плотности. На рис. 6 представлены зависимости параметров модели Друкера–Прагера от относительной плотности. Эти параметры вводятся в программный пакет ABAQUS с помощью заранее написанной подпрограммы.

Реологические характеристики образцов различной плотности из порошкового материала ПА-4

Относительная плотность θ	Растяжение q_s , МПа	Одноосное сжатие σ_c , МПа	Сжатие в матрице p_n , МПа
0,612	1,0	34,48	70,50
0,672	1,9	64,10	105,79
0,746	3,0	125,56	141,05
0,790	4,9	136,75	176,50
0,816	5,2	155,98	211,58

На рис. 7 показан общий вид порошкового образца с капсулой толщиной 2 мм после деформации со степенью 15 % в сравнении с образцом, полученным в результате эксперимента, а на

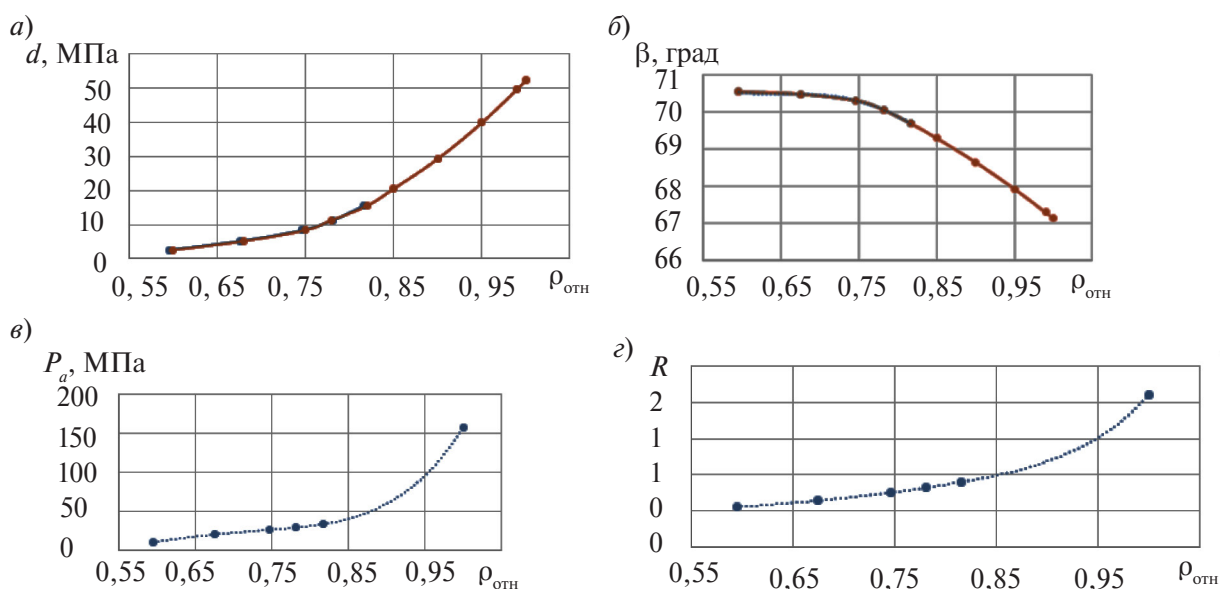


Рис. 6. Зависимость параметров модели Друкера–Прагера от плотности: *a* – параметр адгезии; *б* – угол внутреннего трения; *в* – предел уплотнения; *з* – параметр, характеризующий форму поверхности уплотнения

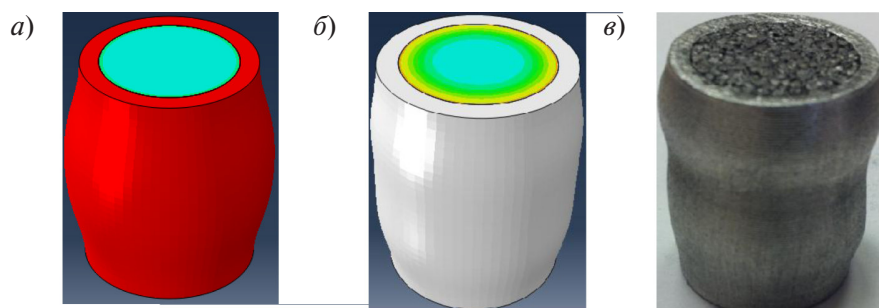


Рис. 7. Общий вид порошкового образца с капсулой после деформации со степенью 15 %: *a* – без подпрограммы; *б* – с подпрограммой; *в* – эксперимент

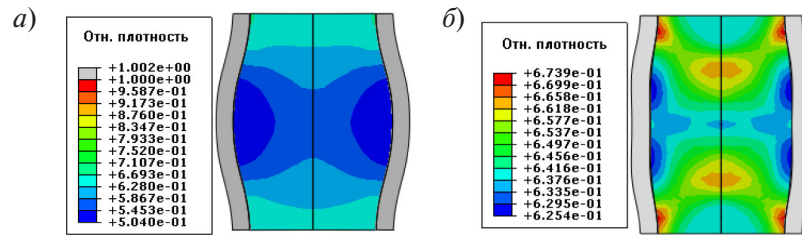


Рис. 8. Распределение плотности по осевому сечению порошкового образца: *а* – моделирование без подпрограммы; *б* – моделирование с подпрограммой

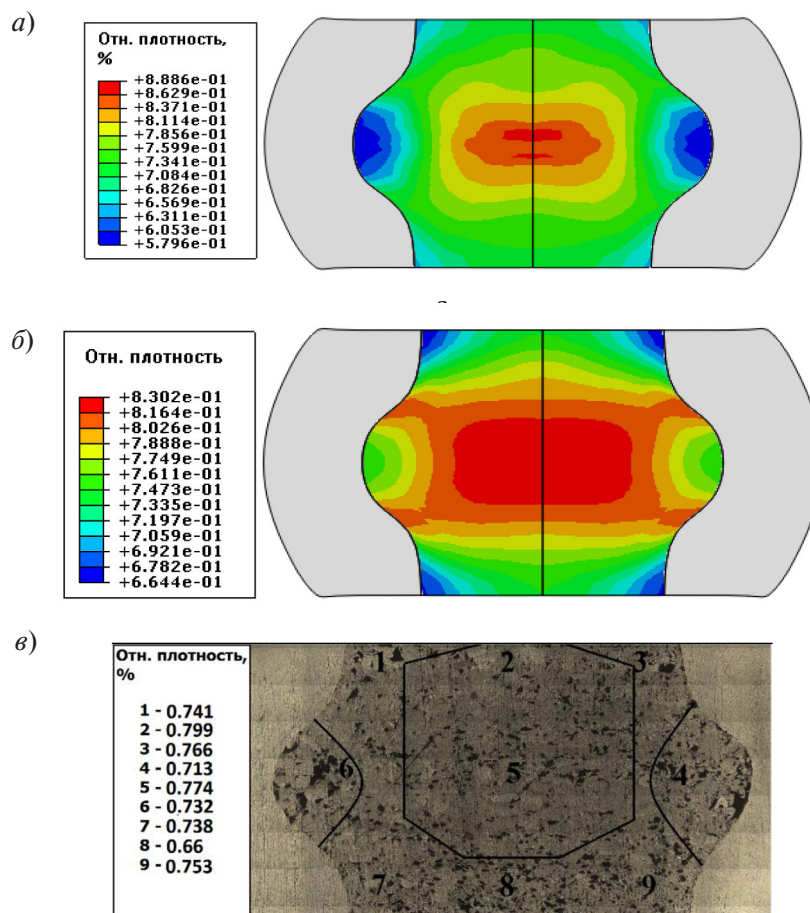


Рис. 9. Распределение плотности в порошковой заготовке при деформировании со степенью 45 %: *а* – моделирование без подпрограммы; *б* – моделирование с подпрограммой; *в* – результаты эксперимента (цифрами обозначены различные области порошковой заготовки, каждой из которых соответствует определенная пористость)

рис. 8 представлено распределение плотности порошкового образца по осевому сечению.

Из рис. 7, 8 следует, что результат моделирования с использованием подпрограммы практически полностью совпадает с эксперименталь-

ными данными – в обоих случаях осадка образца сопровождается образованием двойной бочки. Моделирование без подпрограммы не позволило точно описать характер течения материала оболочки при осадке.

На рис. 9 показано осевое сечение порошковой заготовки в капсуле толщиной 5 мм, при деформации со степенью 45 %.

Таким образом, под действием пластической деформации оболочки произошло уплотнение заготовки за счет дополнительного воздействия гидростатической составляющей тензора напряжений в порошковой заготовке. Результаты моделирования при использовании подпрограммы и без подпрограммы хорошо согласуются с экспериментальными данными (см. рис. 9). Различие значений средней плотности, полученных в эксперименте и при моделировании, составляет 0,8 % для модели с использованием подпрограммы и 1,5 % для модели без подпрограммы. Это доказывает адекватность разработанных компьютерных моделей и возможность их использования при моделировании процессов осадки, а также более сложных процессов деформирования, в которых относительная плотность изменяется несущественно.

Следующей задачей работы была проверка адекватности созданных компьютерных моделей для процесса прессования в закрытой матрице, где относительная плотность порошкового тела изменяется в довольно широком диапазоне.

Исследование процесса сжатия в закрытой матрице

На рис. 10 представлены конечные сетки и распределение плотности по осевому сечению

порошковой заготовки после деформирования со степенью 32 % в закрытой матрице.

Для количественной оценки возможности использования предложенной компьютерной модели построены и сопоставлены кривые уплотнения алюминиевого порошка ПА-4, полученные при математическом моделировании и в практических экспериментах (рис. 11).

Как видно на рис. 11, результаты моделирования с использованием разработанной подпрограммы качественно и количественно удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными: различие значений средней плотности в эксперименте и при моделировании составляет 1 % для модели с использованием подпрограммы и 10,3 % для модели без подпрограммы.

Выводы и практические рекомендации

Сравнение результатов моделирования процесса прессования в закрытой матрице, где относительная плотность порошкового тела изменяется в сравнительно широком диапазоне (0,65–0,98), с экспериментальными данными показало, что модель с использованием подпрограммы позволяет получить результаты, точнее описывающие течение порошкового материала по сравнению с моделью без подпрограммы. Различие средней относительной плотности в эксперименте и при моделировании составляет 1% для модели с использованием подпрограммы и 10,3% для модели без подпрограммы. При чем

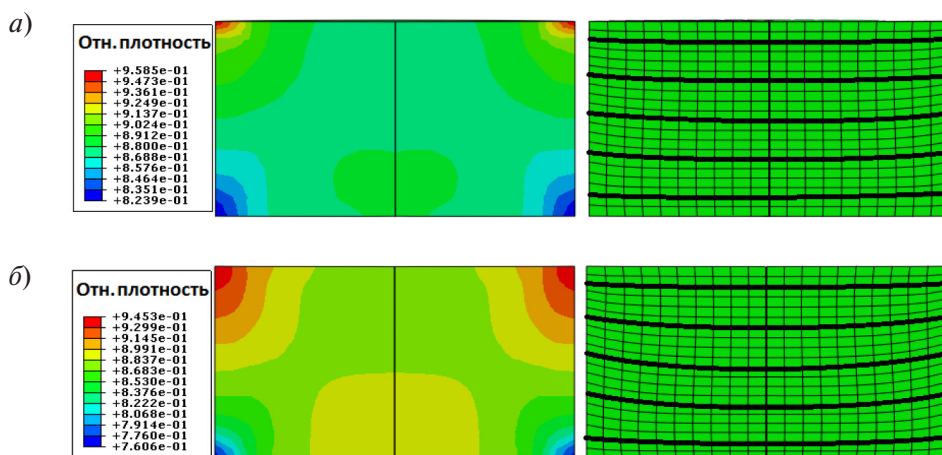


Рис. 10. Сетки конечных элементов и распределение плотности по осевому сечению порошковой заготовки после деформирования со степенью 32 %: *a* – без подпрограммы с параметрами модели, соответствующей плотности $\rho = 0,7$; *б* – с подпрограммой, обновляющей параметры модели при изменении плотности

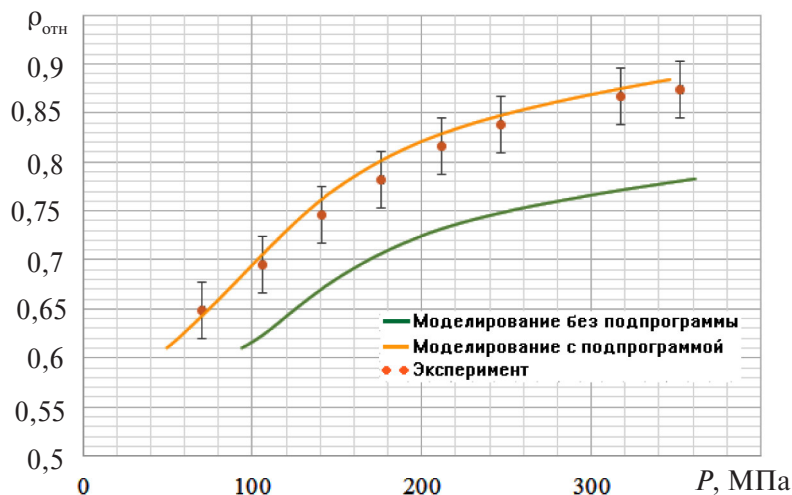


Рис. 11. Кривые уплотнения алюминиевого порошка ПА-4, полученные при сжатии в замкнутой матрице

этом больше изменение плотности в процессе прессования, тем больше расхождение между результатами эксперимента и математического моделирования без подпрограммы (см. рис. 11).

Таким образом, можно говорить об эффективности использования модели Друкера–Прагера и программного пакета ABAQUS при моделировании процесса прессования порошковых материалов в закрытой матрице. Использование подпрограммы позволяет обновлять локальные параметры материалов в каждый момент времени в расчетном модуле программного пакета ABAQUS. Применение подпрограммы позволяет повысить точность расчетов пористости и напряженно-деформированного состояния в порошковых материалах, что особенно важно для сложных процессов уплотнения порошковых заготовок (экструзия, равноканальное угловое прессование, прокатка), при которых изменение плотности лежит в широком диапазоне.

Для процесса осадки алюминиевых образцов в капсуле, при котором плотность образцов изменяется незначительно, сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало, что качественная картина распределения деформаций и относительной плотности при моделировании с использованием подпрограммы и без ее использования практически совпадают с результатами экспериментальных исследований. Различие плотности между экспериментом и моделированием составляет 0,8 % для модели с использованием подпрограммы и 1,5 % для модели без подпрограммы. При этом следует отметить, что программный пакет ABAQUS и встроенная в него модель Друкера–Прагера позволяют получить результаты более точные, чем результаты авторов в работе [1] с использованием программных пакетов DEFORM (со встроенной моделью POROUS) и ANSYS/LS-DYNA (с моделью CAP GEOLOGIC).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Технология послыонного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 8. С. 40–45.

2. Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А. Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследова-

ние их свойств // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 2. С. 35–41.

3. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Особенности моделирования процесса послыонного синтеза изделий электронным лучом // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 11. С. 91–96.

4. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н. Прессование гетерофазных увлажненных порошко-

вых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 6. С. 12–16.

5. 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. № 3(178). С. 148–155.

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

7. 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.

8. 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.

9. Фук Доан Ван, Цеменко В.Н., Ганин С.В. Моделирование процесса осадки порошкового материала в оболочке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. №3 (226). С. 30–39. DOI:10.5862/JEST.226.4.

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

11. Друянов Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел М.: Машиностроение, 1989. 168 с.

12. Krezalek I., Sivaku-mar K. Computational simulation of powder movement during uniaxial die compaction of metal powders // Journal of Materials Processing Technology. 1995. Vol. 48(1). P. 421–428.

13. Borovkov A.I., Shevchenko D.V. Non-linear Finite Element Modeling of the Titanium Briquettes Hot Extrusion Process // Computational Mechanics. 2004. 7 p.

14. Han L.H., Elliott J.A., Bentham A.C., Mills A., Amidon G.E., Hancock B.C. A modified Drucker-Prager Cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders. International Journal of Solids and Structures. 2008. Vol. 45. P. 3088–3106.

15. Abaqus Analysis User's Guide. Vol. 3: Materials // Abaqus 6.13.

REFERENCES

1. 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.)

2. 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.)

3. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A., Kopayev V.N. Osobennosti modelirovaniya protsessy posloynogo sinteza izdeliy elektronnyim 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.)

4. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kокорин 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.)

5. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kокорин V.N., Sizov N.A. Issledovaniye protsessy 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. № 3(178). S. 148–155. (rus.)

6. Rudskoy A.I., Kокорин V.N., Kondratyev S.Yu., Filimonov V.I., Kокорин 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.)

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

8. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A. Algoritm i tekhnologicheskkiye protsessy sinteza poroshkovykh detalей 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.)

9. Fuk Doan Van, Tsemenko V.N., Ganin S.V. Modelirovaniye protsessy osadki poroshkovogo materiala v 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. (rus.)

10. **Tsemenko V.N.** Deformirovaniye poroshkovykh sred. [Deformation of powder medium] SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2001. 104 s. (rus.)

11. **Druyanov B.A.** Prikladnaya teoriya plastichnosti poristykh tel [Applied theory of plasticity of porous bodies] M.: Mashinostroyeniye, 1989. 168 s. (rus.)

12. **Krezalek I., Sivaku-mar K.** Computational simulation of powder movement during uniaxial die compaction of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*. 1995. Vol. 48(1). P. 421–428.

13. **Borovkov A.I., Shevchenko D.V.** Non-linear Finite Element Modeling of the Titanium Briquettes Hot Extrusion Process. *Computational Mechanics*. 2004. 7 p.

14. **Han L.H., Elliott J.A., Bentham A.C., Mills A., Amidon G.E., Hancock B.C.** A modified Drucker-Prager Cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 45 (2008) P. 3088–3106. 19 p.

15. Abaqus Analysis User's Guide. Volume 3: Materials. Abaqus 6.13.

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

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

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