

УДК 539.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ НЕКОМПАКТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Березин И.М., Залазинский А.Г.*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, e-mail: berezin.e-mail@yandex.ru*

Для определения условий пластического течения некомпактных материалов применен структурно-феноменологический подход. Предложена модель материала, которая обладает широкими возможностями и может быть использована для описания сжимаемых сред при больших пластических деформациях. Данная модель позволяет определить характер изменения геометрии пор при уплотнении и пластическом формоизменении. Разработан экспериментально-аналитический метод нахождения внутренних переменных в определяющих соотношениях уплотняемой среды. С этой целью построена объемная модель представительной ячейки пористого материала, на ее основе осуществлено имитационное моделирование процессов гидростатического прессования, компактирования в закрытой пресс-форме, а также чистого сдвига. Предложены простые математические модели для определения пределов текучести на всестороннее сжатие и сдвиг уплотняемых материалов. Тестирование введенных условий пластического течения сжимаемых материалов осуществили при решении задачи полунепрерывного выдавливания пористой массы.

Ключевые слова: металлические порошки, уплотнение, пористость, условия текучести, компьютерное моделирование, выдавливание

IDENTIFICATION OF THE DETERMINATIVE CORRELATIONS OF PLASTICALLY COMPRESSED MATERIALS

Berezin I.M., Zalazinskiy A.G.*Institute of Mechanical Engineering, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, e-mail: berezin.e-mail@yandex.ru*

In this paper we examine the structure of constitutive laws for the compaction of metal powders. It is argued that for practical processing schedules a structure-phenomenological compaction theory is capable of representing the material response. A three dimensional finite element model is used to explore the densification yield surfaces of porous materials. Spherical voids in the structure discretized with a finite element mesh allow for a full description of the plastic deformation mechanism. Modeling based on a finite element method using idealized structures of porous solid is proposed here for the calculation of the effective plastic properties of plastically compressed materials. Numerical study shows that the yield strength of porous solid is rather structure sensitive and, therefore, the micro-structure parameters should be incorporated in the model in order to provide adequate description of plastic behavior. Compaction modes ranging from hydrostatic to that of high shear are studied. Methods for determining the material parameters of the model are described. The mechanical response predicted by this model is in reasonable agreement with experimental results.

Keywords: metal powders, compaction, density distribution, yield surface, finite element simulation, extrusion

Обзор работ, касающихся вопросов уплотнения, консолидации и разрушения некомпактных и пористых материалов, приведен в работе [4]. Прикладная теория пластичности пористых тел изложена в работе [1]. Показано, что в процессе пластического деформирования некомпактные и пористые материалы испытывают значительную необратимую деформацию изменения объема, что принципиально отличает их от несжимаемых тел. При этом для моделирования процессов уплотнения таких материалов используют два основных подхода: феноменологический [1, 5] и структурно-феноменологический [2, 3]. Феноменологический подход не позволяет учесть влияние формы пор, геометрических параметров пор и их распределение по объему на процессы пластического формоизменения деформируемых пористых тел. Для структурно-феноменологического подхода характерно использование связи геометрической структуры пористого тела и физико-механических свойств зернистого каркаса со свой-

ствами сопротивления сжимаемых сред необратимому формоизменению. При этом используются континуальные представления о деформируемой среде, реологические характеристики которой получают в результате анализа элементов структуры. В настоящее время существует значительный ряд работ, в которых рассмотрены и обобщены основные положения, используемые при решении задач механики структурно-неоднородных материалов, построены замкнутые системы уравнений движения гетерогенных смесей при заданных физико-химических свойствах структурных составляющих. Однако проблема количественного описания многообразия процессов деформирования рассматриваемых сред не может считаться окончательно решенной.

Целью работы является решение задач технологической механики для совершенствования процессов уплотнения некомпактных и пористых материалов с использованием методов компьютерного моделирования; теоретическое обобщение

исследований процессов формирования металлических заготовок из порошкообразного сырья и создание научно-обоснованных предпосылок для разработки новых технологических процессов прессования и выдавливания высокоплотных заготовок.

Для решения поставленных задач приняты допущение, что уже незначительное приращение сжимающей нагрузки вызывает уменьшение объема уплотняемого материала. Это дает основание считать, что упругая деформация такого материала несущественно влияет на его уплотнение. Скорости пластической деформации пропорциональны напряжениям в текущий момент; напряженное состояние определяет мгновенные приращения компонент пластической деформации. Для определения приращений пластической деформации $d\epsilon_{ij}$ используется функция $\Phi(\sigma_{ij})$, называемая пластическим потенциалом. Вид этой функ-

ции задается таким образом, чтобы уравнения пластического течения можно было представить в виде

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \cdot \partial\Phi / \partial\sigma_{ij},$$

где $d\lambda \geq 0$ – некоторый неопределенный малый скалярный множитель. Для теории пластичности важен случай, когда функция пластичности и пластический потенциал совпадают, т.е. $f = \Phi$. При этом относительно легко устанавливаются принципы экстремальности и теорема единственности, что сообщает теории законченность. В этом случае выполняется ассоциированный закон пластического течения.

Для изотропных пластически деформируемых сжимаемых материалов имеем

$$f\{\sigma, I_2(D_\sigma), I_3(D_\sigma)\} = 0. \quad (1)$$

Тогда в соответствии с ассоциированным законом пластического течения

$$d\epsilon_{ij} = \lambda_p \frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{ij}} = \lambda_p \left[\frac{1}{3} \frac{\partial f_p}{\partial \sigma} \delta_{ij} + \frac{\partial f_p}{\partial I_2(D_\sigma)} \cdot \frac{\partial I_2(D_\sigma)}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial f_p}{\partial I_3(D_\sigma)} \cdot \frac{\partial I_3(D_\sigma)}{\partial \sigma_{ij}} \right]. \quad (2)$$

В современных расчетных комплексах, основанных на методе конечных элементов, для моделирования процессов пластического деформирования некомпактных (пористых) материалов используют модели Cam-Clay Plasticity, Porous metal plasticity и др. Одной из таких моделей является так называемая модифицированная модель текучести Друкера–Прагера (Modified Drucker-Prager cap), также известная как DPC-модель [6]. На рис. 1 приведена трехмерная интерпретация DPC-модели.

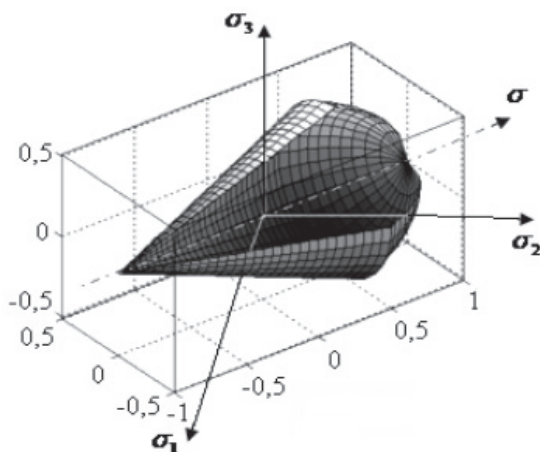


Рис. 1. Вид замкнутой поверхности текучести Друкера–Прагера (3/4 модели) $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma$ – главные напряжения и гидростатическое давление, представленные в безразмерном виде

Для DPC-модели предельная поверхность в плоскости σ – τ (первого и второго инвариантов тензора напряжений соответ-

ственно) представляет собой прямую, а поверхность текучести – дугу эллипса. Протяженность вдоль гидростатической оси со стороны отрицательных значений среднего напряжения определяется пределом текучести на всестороннее сжатие. В отличие от эллиптического на коническом участке действует неассоциированный закон течения. Вектор скоростей деформаций ортогонален только к эллиптической поверхности, а его направление в случае, когда поверхность нагружения совпадает с поверхностью текучести, зависит от значения среднего нормального напряжения. Обычно принимают, что коническая составляющая поверхности в процессе деформации остается неизменной эволюции подвергается только эллиптический участок.

Для определения предельной поверхности DPC-модели достаточно провести испытания на радиальное и осевое сжатие цилиндрических образцов. Для определения эллиптического участка необходимо реализовать гидростатическое сжатие и прессование в закрытой пресс-форме. Так как для испытаний на гидростатическое сжатие высокопрочных металлических порошков, например, сплава титана ВТ-22 требуется сложное и дорогостоящее оборудование, возникает необходимость заменить натурные испытания имитационным моделированием. Чтобы сравнить результаты экспериментальных исследований с результатами имитационного моделирования в качестве модельного материала выбрали хорошо изученные порошки меди.

Во многих случаях при исследовании процессов деформирования структурно-неоднородных материалов могут быть использованы модели микронеоднородных сред с регулярной структурой, в которой можно выделить представительные элементы – ячейки. На рис. 2 показана объемная модель представительной ячейки деформируемого материала. Для осуществления имитационного моделирования (рис. 3) процессов гидростатического сжатия, компактирования в закрытой пресс-форме, а также сдвига ячейки представительного объема уплотняемого тела применили пакет конечно-элементного анализа ABAQUS (студенческая версия). На рис. 4 приведена зависимость пластических модулей p_s и τ_s при гидроста-

тическом сжатии и чистом сдвиге от относительной пористости.

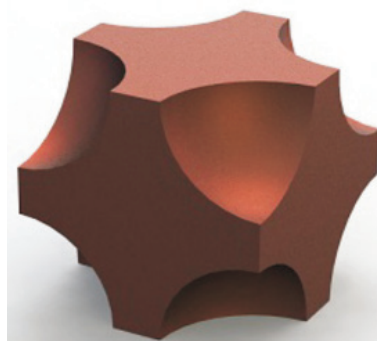


Рис. 2. Модель представительной ячейки пористой меди

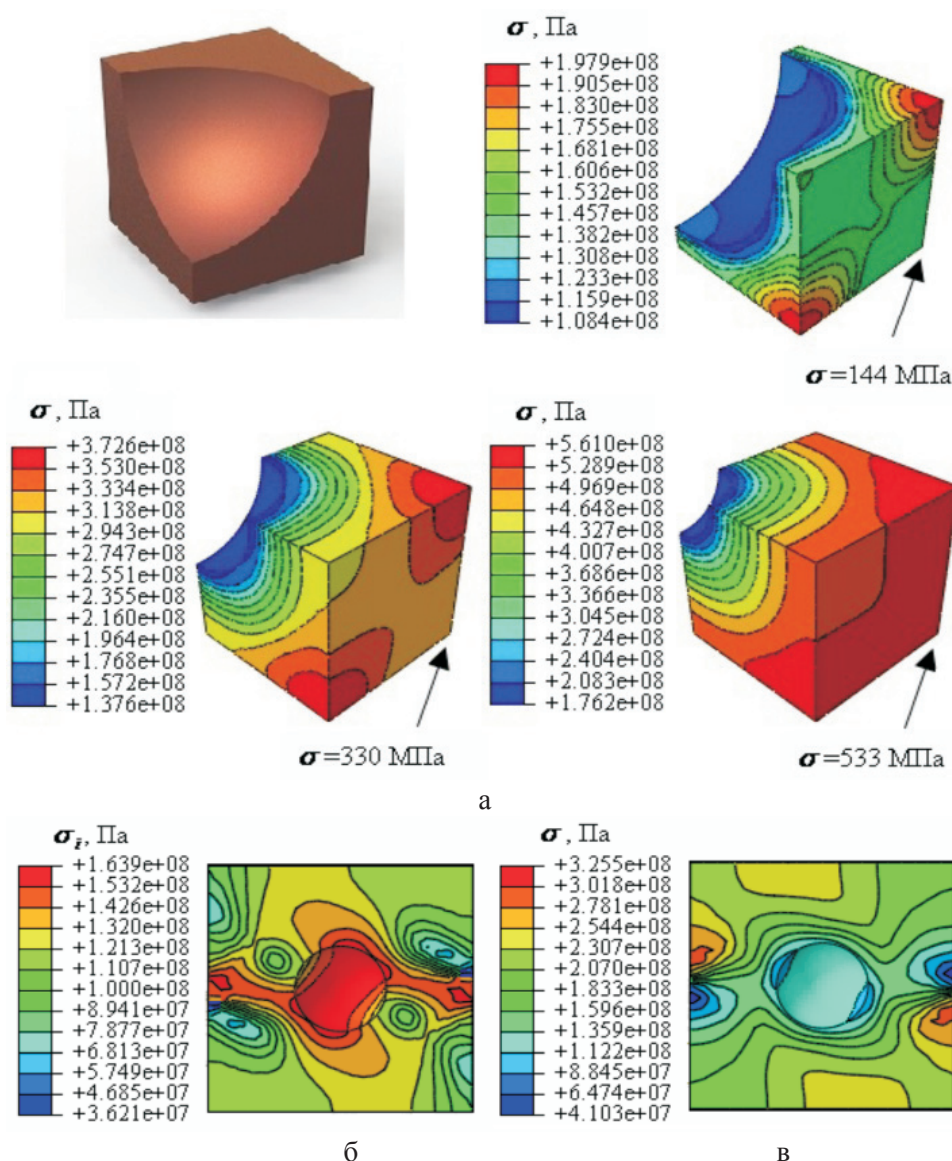


Рис. 3. Результаты имитационного моделирования процессов гидростатического сжатия (а) и сдвига (б, в) ячейки представительного объема пористого тела: а – поле среднего нормального напряжения (гидростатическое сжатие); б – поле интенсивности напряжений (сдвиг); в – поле среднего нормального напряжения (сдвиг)

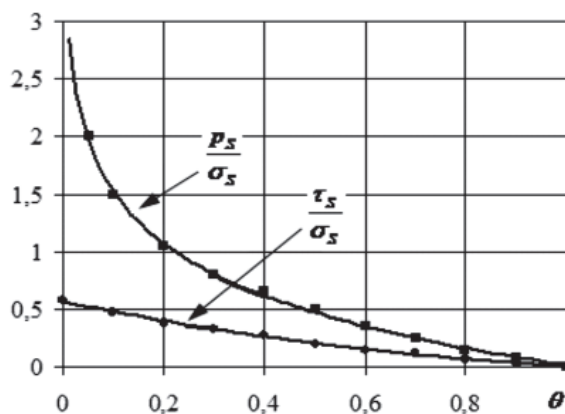


Рис. 4. Зависимость пластических модулей p_s и τ_s при гидростатическом сжатии и сдвиге ячейки представительного объёма от пористости (σ_s – предел текучести меди при нулевой пористости)

Результаты исследования процессов уплотнения некомпактного материала из меди при гидростатическом сжатии и сдвиге на 3D-моделях показали хорошую сходимость расчётных и экспериментальных данных, приведенных в работах [1, 4, 5], что позволило использовать имитационное моделирование для идентификации определяющих уравнений и решения задач пластической деформации сжимаемых сред на

основе порошков из высокопрочного сплава титана ВТ-22.

Выполненные исследования позволили разработать имитационные модели достаточно сложных задач технологической механики пористых тел: полунепрерывное выдавливание заготовки и формование детали сложной формы из металлического порошкообразного сырья.

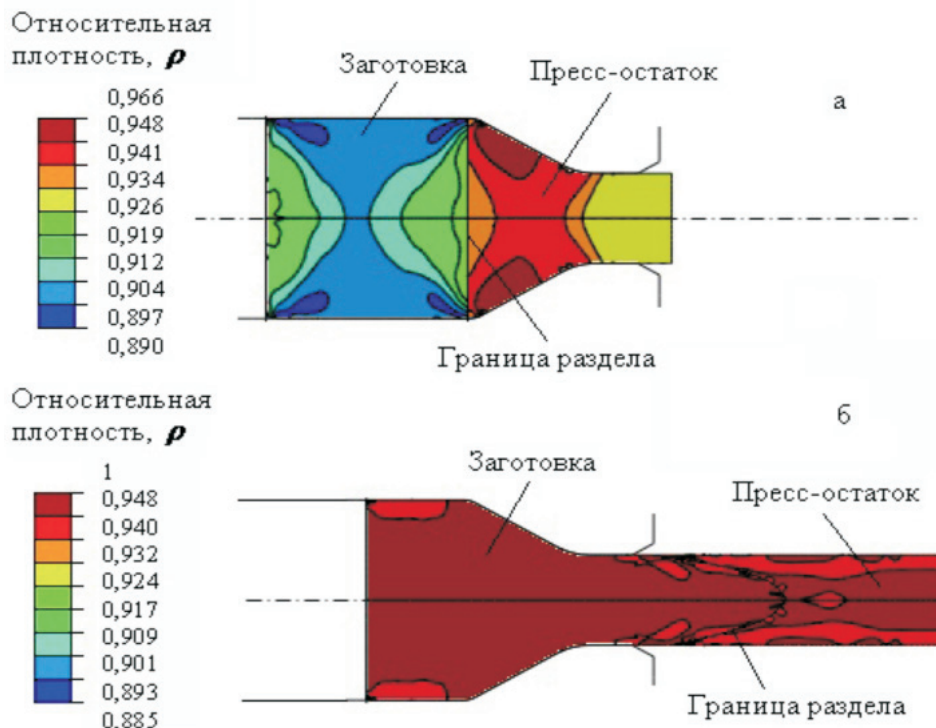


Рис. 5. Распределение относительной плотности ρ по сечению выдавливаемой заготовки:
а – распрессовка заготовки;
б – выход границы раздела заготовок из калибрующего пояска матрицы

На рис. 5 показано распределение относительной плотности по сечению заготовки для случая начальной пористости $\rho_3 = 0,89$

при угле матрицы $2\alpha = 60^\circ$ и вытяжке $\mu = 4,94$ на различных стадиях процесса выдавливания. Видно (рис. 5, а), что от-

носительная плотность материала брикета, деформированного в непосредственной близости от пуансона, приближается к плотности пресс-остатка. Далее материал брикета проходит через коническую часть матрицы с малым изменением плотности, что объясняется недостаточным уровнем средних нормальных напряжений, отвечающих за изменение объема. При этом наибольшая скорость истечения материала находится на оси симметрии заготовки (рис. 5, б). На выходе из калибрующего пояса матрицы вид напряженного состояния меняется: продольная компонента тензора напряжений переходит от сжатия к растяжению,

вследствие чего наблюдается незначительное разуплотнение. Следует отметить, что в принятом диапазоне значений μ и α относительная плотность материала ρ на выходе из очага деформации несущественно зависит от начальной пористости заготовки ρ_3 .

Результаты вычислительного эксперимента были обработаны с помощью регрессионного анализа в программном комплексе компьютерной математики MATLAB. Это позволило установить зависимости параметров процесса выдавливания, таких как пористость θ и давление выдавливания $p/(\sqrt{3}\tau_s)$ от угла α и вытяжки μ :

$$p/\sqrt{3}\tau_s = -2,151 + 0,0512\alpha + 1,2098\mu - 14,16 \cdot 10^{-5}\alpha^2 - 0,06\mu^2; \quad (3)$$

$$\theta = 0,0255 - 2,5 \cdot 10^{-5}\alpha - 6,04 \cdot 10^{-5}\mu - 2,5 \cdot 10^{-7}\alpha^2 - 1,28 \cdot 10^{-4}\mu^2. \quad (4)$$

Результаты натурального эксперимента показали пригодность разработанной имитационной модели для совершенствования технологии полунепрерывного выдавливания заготовок из порошкообразного металлического сырья.

Заключение

Разработан экспериментально-аналитический метод нахождения внутренних переменных в определяющих соотношениях уплотняемой среды. С этой целью строится объемная модель представительной ячейки и осуществляется имитационное моделирование процесса пластического течения пористой массы. Предложены простые методы для определения пределов текучести на всестороннее сжатие и сдвиг уплотняемых материалов. Осуществлено компьютерное моделирование процесса полунепрерывного выдавливания пористой заготовки, позволившее установить зависимости усилия выдавливания и пористости выдавленных заготовок от основных параметров процесса.

Список литературы

1. Друянов Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел. – М.: Машиностроение, 1989. – 168 с.
2. Залазинский А.Г. Пластическое деформирование структурно-неоднородных материалов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – 490 с.
3. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел. – М.: Наука, 1984. – 115 с.
4. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Дёмин В.А. Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 272 с.
5. Феноменологические теории прессования порошков / М.Б. Штерн, Г.Г. Сердюк, Л.А. Максименко,

Ю.В. Трухан, Ю.М. Шуляков. – Киев: Наукова думка, 1982. – 140 с.

6. Han L.H., Elliott J.A., Benthall 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. – № 10. – P. 3088–3106.

References

1. Druyanov V.A. Prikladnaja teorija plastichnosti poristyh tel [Applied the theory of plasticity porous bodies]. Moscow. Mechanical engineering, 1989, 168 p.
2. Zalazinskiy A.G. Plasticheskoe deformirovanie strukturno-neodnorodnyh materialov [Plastic deformation of non-uniform structure materials]. Ekaterinburg. Ural Branch Russian Academy of Sciences, 2000, 490 p.
3. Sokolkin J.V., Tachkinov A.A. Mehanika deformirovaniya i razrusheniya strukturno-neodnorodnyh tel [Mechanics of deformation and destruction structurally-non-uniform bodies]. Moscow. Science, 1984, 115 p.
4. Shestakov N.A., Subich V.N., Djomin V.A. Uplotnenie, konsolidacija i razrushenie poristyh materialov [Condensation, consolidation and destruction of porous materials]. Moscow. Fizmatlit, 2009, 272 p.
5. Shtern M.B., Serdjuk G.G., Maksimenko L.A., Truhan Ju.V., Shuljakov Ju.M. Fenomenologicheskie teorii pressovaniya poroshkov [Phenomenological theories of pressing of powders]. Kiev. Naykova dumka, 1982, 140 p.
6. Han L.H., Elliott J.A., Benthall 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, no. 10, 2008, pp. 3088–3106.

Рецензенты:

Поляков А.П., д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории системного моделирования Института машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург;

Лехов О.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой механики машиностроительного факультета, РГПУ, г. Екатеринбург.

Работа поступила в редакцию 18.06.2013