

На правах рукописи



БЕРЕЗИН ИВАН МИХАЙЛОВИЧ

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО УСЛОВИЯ
ТЕКУЧЕСТИ ДРУКЕРА-ПРАГЕРА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ УПЛОТНЕНИЯ
ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 01.02.04 - Механика деформируемого твёрдого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте машиноведения Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: Залазинский Александр Георгиевич,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Стружанов Валерий Владимирович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт машиноведения Уральского отделе-
ния Российской академии наук, главный научный
сотрудник

Таугер Виталий Михайлович,
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образова-
тельное учреждение высшего профессионального об-
разования «Уральский государственный университет
путей сообщения», профессор кафедры
«Мехатроника»

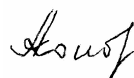
Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего профессио-
нального образования «Уральский федеральный
университет имени первого Президента России
Б.Н.Ельцина»

Защита состоится 28 ноября 2013 г. в 15-30 часов на заседании диссертаци-
онного совета Д 004.023.01 при Федеральном государственном бюджетном учреж-
дении науки Институте машиноведения Уральского отделения Российской академии
наук по адресу: 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государст-
венного бюджетного учреждения науки Института машиноведения Уральского от-
деления Российской академии наук.

Автореферат разослан 23 октября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Коновалов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При изготовлении изделий из металлических порошков наибольшие производственные расходы относятся к этапу пластического деформирования заготовок, который в значительной мере определяет качество и закладывает основные физико-механические свойства готовой продукции. Математическое и компьютерное моделирование процессов пластической обработки позволяет анализировать влияние различных технологических факторов на свойства продукции без проведения дорогостоящих производственных экспериментов. Существенные результаты в решении задач механики пластического деформирования порошковых и пористых материалов достигнуты: С.Е.Александровым, В.Н.Анциферовым, Д.Д.Ивлевым, В.Л.Колмогоровым, Ю.Н.Логиновым, А.И.Рудским, В.М.Сегалом, М.Б.Штерном, В.Н.Цеменко и др. Практический интерес к решению подобных задач вызван развитием программ для инженерных расчетов, интегрированных в автоматизированные системы проектирования технологических процессов. Для компьютерного моделирования процессов деформирования пластически сжимаемых материалов необходимо применение достаточно сложных реологических моделей, формулировка которых осуществляется путем нахождения входящих в них внутренних переменных, количество которых может быть достаточно большим. При этом достоверность полученных результатов расчета непосредственно зависит как от принятой модели среды, так и от методов ее идентификации.

Степень разработанности темы исследования. Различные модели, описывающие поведение уплотняемых материалов, приведены в работах Б.А.Друянова, А.М.Лаптева, В.Е.Перельмана, Т.Tabata, S.Shima, R.G.Green и др. Одной из наиболее популярных реологических моделей, позволяющей одновременно описывать как процессы уплотнения, так и разуплотнения пластически сжимаемых материалов, является модифицированное условие текучести Друкера-Прагера. Применение указанной модели для моделирования процессов уплотнения порошковых и пористых металлических материалов рассмотрены в работах O.Coube, H.Riedel, T.Kraft, H.Chtourou, M.Guillot, A.Gakwaya и др. Существующие методики идентификации названного условия текучести в основном опираются на экспериментальное изучение поведения пластически сжимаемых материалов при высоких давлениях. Однако, выполнение экспериментальных исследований не всегда целесообразно, а иногда и невозможно на существующем оборудовании, в особенности это относится к исследованию металлических материалов с повышенными физико-механическими свойствами. В этом случае могут быть использованы подходы механики структурно-неоднородных тел, в частности модели сред с регулярной структурой. К материалам с упорядоченным расположением элементов можно отнести порошковые и пористые металлические материалы, имеющие типичное микронеоднородное строение. В связи с этим актуальным является разработка методики идентификации модифицированного условия текучести Друкера-Прагера, основанной на подходах механики

структурно-неоднородных тел, позволяющей обеспечивать минимальное количество экспериментов для нахождения пластических модулей порошковых и пористых металлических материалов.

Цель работы. Используя модель среды с регулярной структурой, разработать методику идентификации модифицированного условия текучести Друкера-Прагера для порошковых и пористых металлических материалов. На основе полученных результатов осуществить моделирование и определить основные закономерности и условия деформирования в процессах прессования и выдавливания.

Задачи исследования.

Путем преобразования уравнения лемнискаты Бернулли аппроксимировать кривую текучести Друкера-Прагера и определить критерии ее приближения для порошковых и пористых металлических материалов.

На основе решения краевых задач пластического деформирования ячеек представительных объемов порошковых и пористых материалов определить зависимости пределов текучести при чистом сдвиге, всестороннем равномерном сжатии и сжатии в закрытой пресс-форме с учетом изменения пористости в процессе пластической деформации.

С применением полученных условий текучести осуществить имитационное моделирование процессов прессования и выдавливания.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем.

С применением модели сжимаемой среды с регулярной структурой разработана методика идентификации модифицированного условия текучести Друкера-Прагера, учитывающей изменение плотности материала в процессах пластического деформирования.

Используя геометрическое преобразование лемнискаты Бернулли, введено новое уравнение, аппроксимирующее кривую текучести Друкера-Прагера и определены критерии его приближения, что позволило обеспечить минимальное количество экспериментов и повышение точности при нахождении пластических модулей порошковых и пористых металлических материалов.

Предложены новые зависимости пределов текучести при чистом сдвиге, всестороннем равномерном сжатии и сжатии в закрытой пресс-форме, полученные в результате решения краевых задач пластического деформирования ячеек представительных объемов порошковых материалов со сферической частицей и пористых материалов со сферической порой с учетом изменения пористости в процессе пластической деформации.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Доказана и экспериментально подтверждена возможность применения лемнискаты при построении кривых текучести для порошка титана ВТ-22, титановой губки и порошка меди марки ПМС-1, что вносит вклад в развитие представлений о режимах их пластического деформирования.

С применением полученных параметров условия текучести Друкера-Прагера осуществлено моделирование процесса прессования титановой губки легированной

водородом в закрытой пресс-форме, построена зависимость давления прессования от пористости с учетом влияния сил трения, действующих на стенках пресс-формы.

В результате имитационного моделирования процесса полунепрерывного гидромеханического выдавливания определены закономерности процесса уплотнения пористых заготовок из титановой губки. Установлено влияние угла конусности матрицы и степени вытяжки на давление выдавливания и остаточную пористость прутков титановой губки.

Предложена схема прессования порошковых и пористых металлических материалов в условиях неравномерного всестороннего сжатия эластичными средами, позволяющая развивать более высокие изостатические давления на заготовку по сравнению со схемой гидростатического прессования, управлять величиной напряжений всестороннего сжатия и степенью деформации независимо друг от друга.

На основе моделирования прессования заготовки сложной формы из порошковой меди определено процентное содержание пластификатора, обеспечивающее наиболее равномерную проработку материала, снижение величины давления прессования и давления выпрессовки без существенного ухудшения ее прочностных свойств.

Результаты исследования используются в курсе лекций по дисциплине «Теория автоматического управления» на кафедре «Информационные технологии и автоматизация проектирования» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина. Отдельные разделы диссертационной работы выполнялись в рамках работ по планам научно-исследовательских работ Института машиноведения УрО РАН, проекту № 12-М-13-2028 «Разработка фундаментальных основ технологии деформирования металлических порошков методом полунепрерывного выдавливания и волочения прутков». Результаты исследований использованы: в ФГБУН ИМЕТ для разработки технологии прессования деталей на основе порошка сплава титана ВТ-22; при выполнении работ по договорам ИМАШ УрО РАН: №14/2011 с ООО «Профмаркет», г.Екатеринбург; №25/2012 с ООО «Мастер», г.Екатеринбург и при выполнении научно-исследовательской работы с ООО «Акварин» по разработке технологии изготовления деталей ответственного назначения из порошков титановых сплавов.

Методология и методы исследования. Для решения задач уплотнения пористых металлических материалов применяются подходы механики структурно-неоднородных тел. Численное моделирование осуществлено методом конечных элементов с использованием системы инженерного анализа Abaqus. Для обработки экспериментальных данных использованы сертифицированные системы сбора исходной информации испытательных машин Tinius Olsen SUPER “L” 60 и ZWICK BT1-FR050THW/A1K .

Положения, выносимые на защиту.

Методика идентификации модифицированного условия текучести Друкера-Прагера с использованием модели пластически сжимаемой среды с регулярной структурой.

Уравнение, аппроксимирующее кривую текучести Друкера-Прагера для порошковых и пористых металлических материалов.

Зависимости пределов текучести при чистом сдвиге, всестороннем равномерном сжатии и сжатии в закрытой пресс-форме, полученные в результате анализа деформации ячеек представительных объемов порошковых и пористых материалов.

Результаты исследований реологических характеристик порошков меди марки ПМС-1, титановой губки марки ТГ-100 и сплава титана марки ВТ-22.

Достоверность результатов подтверждается применением численных методов расчета реализованных в системе инженерного анализа Abaqus; современных приборов измерения и воспроизводимостью экспериментов; качественным совпадением результатов моделирования с результатами известных теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены на следующих конференциях: III Молодежная научно-практическая конференция «Инновационный потенциал молодежи – вклад в развитие ОАО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма, 2010 г.; VI Российская научно-техническая конференция «Механика микронеоднородных материалов и разрушение», Екатеринбург, 2010 г.; XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь, 2013 г.; Международная научно-практическая конференция «Инженерные системы – 2013», Москва, 2013 г; Научно-практическая конференция с международным участием и элементами школы для молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР», Екатеринбург, 2013 г.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, указаны ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту, указаны печатные работы, в которых отражены ее основные результаты.

Первая глава посвящена постановке краевых задач механики пластически-сжимаемого тела. Дана общая характеристика методов идентификации реологических моделей. Показано применение феноменологического и структурно-феноменологического подходов при изучении процессов пластического деформирования пластически-сжимаемых материалов. Приведен обзор методов расчёта процессов формоизменения и уплотнения пористых тел при пластической деформации. Дана конечно-элементная формулировка краевых задач механики деформирования уплотняемых материалов и рассмотрены программные средства, используемые для моделирования процессов уплотнения порошковых и пористых материалов.

Вторая глава посвящена описанию методов и оборудования для идентификации параметров модели текучести Друкера-Прагера. Определены морфология и свойства металлических порошков, используемых для экспериментальных исследований и последующего имитационного моделирования процессов их пластического деформирования.

Для идентификации параметров модели текучести Друкера-Прагера необходимо провести несколько экспериментов, в частности сжатие пористой массы равномерным всесторонним давлением, а также радиальное и осевое сжатие предварительно спрессованных образцов разной пористости (рисунок 1). Последний способ наиболее часто используют для определения прочности хрупких материалов, в частности, неспеченных порошковых заготовок. В момент пластического разрушения заготовки при возникновении и росте магистральной трещины, фиксируется усилие, соответствующее началу нарушения целостности образцов, и ход рабочей плиты, после чего испытания прекращаются.



а

б

Рисунок 1 – Радиальное сжатие (а) и осевое сжатие (б) брикетов спрессованных из порошков меди

Для определения предела текучести при испытании на гидростатическое сжатие порошковых материалов предложена конструкция плунжерного гидростата. Его отличительной особенностью является применение бесконтактных уплотнений на плунжере. Герметизация камеры здесь достигается за счет лабиринтного уплотнения, в котором возникает эффект гидравлического сопротивления при течении вязкой жидкости через малый зазор переменного сечения. Определены деформация плунжера и цилиндра под действием давления жидкости и изменение величины зазора и конфигурации щели. Установлена зависимость расхода рабочей жидкости через лабиринтное уплотнение от давления жидкости в камере гидростата. Анализ напряжённо-деформированного состояния устройства показал его работоспособность при давлении в рабочей камере до 200 МПа.

Для повышения допускаемого давления в рабочем пространстве гидростата жидкость заменили эластичной средой, в качестве которой использовали полиуре-

тан Duothan QA965. Устройство и схема процесса эластостатического прессования показаны на рисунке 2.

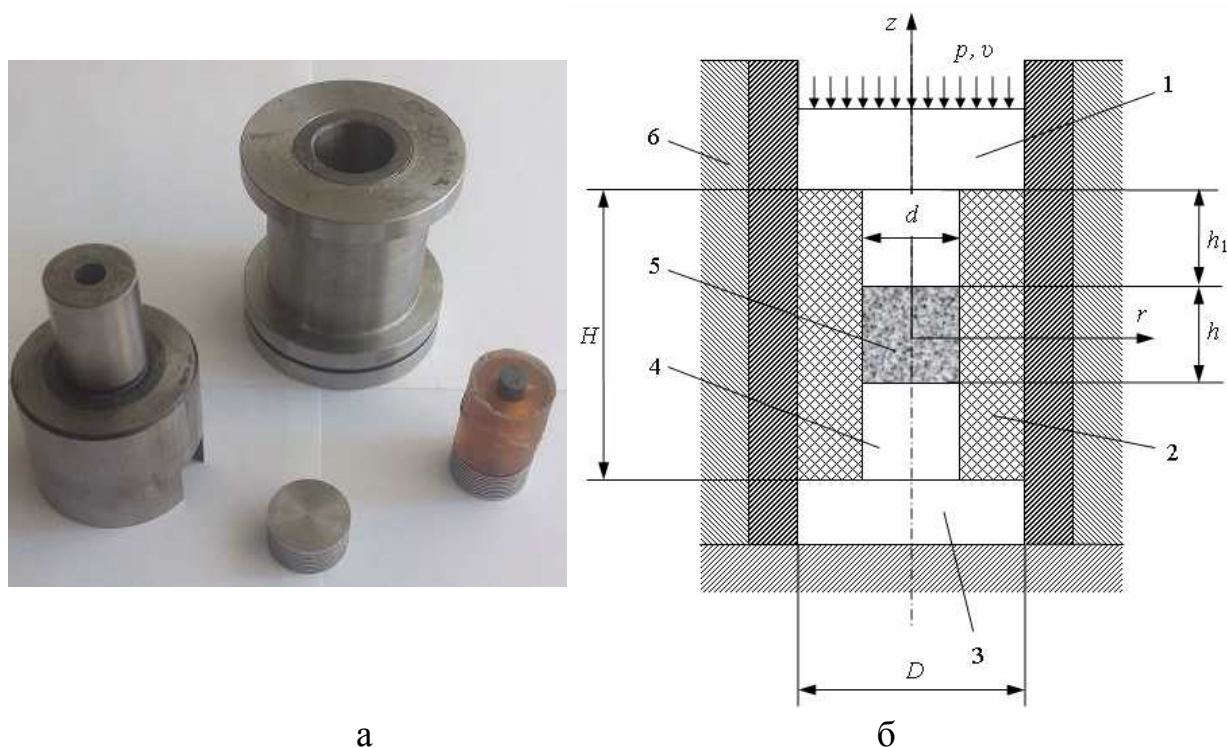


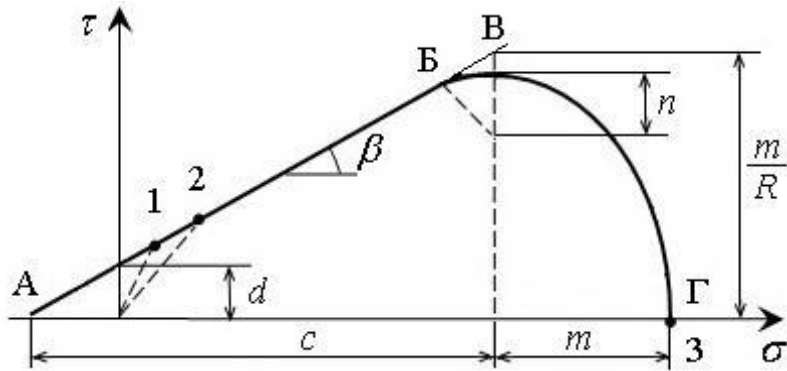
Рисунок 2 – Устройство (а) и схема процесса (б) эластостатического прессования

Устройство работает следующим образом. Металлический порошок 5 помещается между бойками 4 во внутреннюю полость эластичной втулки (бандажа) 2. Рабочим ходом плунжера 1 одновременно с перемещением верхнего бойка 4 осаживают эластичную втулку 2. Прессуемая заготовка осаживается по высоте, увеличивается в диаметре и создает внутреннее давление, под действием которого бандаж не имея возможности радиального растяжения в закрытой пресс-форме, создает боковое давление на компактируемый материал. Схема позволяет управлять величиной напряжений всестороннего сжатия и степенью деформации независимо друг от друга. Уровень бокового давления можно изменять путем применения полиуретановых бандажей с различной величиной объемной сжимаемости. При этом обеспечивается повышение радиального давления со стороны втулки 2 на бойки 4, что позволяет повысить предельно допускаемые нагрузки на бойки 4. Движение плунжера 1 прекращается, когда достигается необходимое изостатическое давление. После этого спрессованная заготовка 5 извлекается, засыпается очередная порция металлического порошка, и цикл прессования повторяется.

Показано, что применение полиуретана Duothan QA965 в качестве деформирующей среды за счет изменения объемной сжимаемости позволяет при одинаковых радиальных напряжениях в стенках контейнера, развивать большие средние нормальные давления на заготовку по сравнению с классической схемой гидростатического прессования.

Проведены экспериментальные исследования процессов уплотнения порошков ВТ-22, ПМС-1 и титановой губки ТГ-100, результаты которых использовались для последующего имитационного моделирования.

Третья глава посвящена разработке методики идентификации модифицированного условия текучести Друкера-Прагера для порошковых и пористых материалов. На рисунке 3 показана геометрическая интерпретация в плоскости $\sigma - \tau$.



Точки: 1 – радиальное сжатие; 2 – осевое сжатие; 3 – гидростатическое сжатие
 Рисунок 3 – Геометрическая интерпретация модели Друкера-Прагера в плоскости $\sigma - \tau$ и схема экспериментов по ее идентификации

Кривая текучести Друкера-Прагера состоит из трех участков AB, ВГ и БВ. Предельная поверхность описывается уравнением (1), поверхность текучести - уравнением (2). Поскольку на стыке участков, описываемых уравнениями (1) - (2), возникает угловая точка, то вводится промежуточный (сглаживающий) участок, описываемый уравнением (3). Для выделенных участков имеем уравнения:

$$f_{AB} = \tau - d - \sigma \cdot \operatorname{tg}(\beta) = 0, \quad (1)$$

$$f_{BG} = \sqrt{(\sigma - c)^2 + \left(\frac{R}{1 + \alpha - \alpha / \cos \beta} \cdot \tau \right)^2} - m = 0, \quad (2)$$

$$f_{BV} = \sqrt{(\sigma - c)^2 + \left[\tau - \left(1 - \frac{\alpha}{\cos \beta} \right) \cdot \frac{n}{\alpha} \right]^2} - n = 0, \quad (3)$$

где d - предельное сопротивление срезу, β - угол наклона образующей предельной поверхности в плоскости $\sigma - \tau$ к гидростатической оси. Функции состояния материала c , m и n могут быть выражены по формулам: $c = \frac{p_s - Rd}{1 + R \tan \beta}$, $m = R(d + c \cdot \operatorname{tg} \beta)$, $n = \alpha(d + c \cdot \operatorname{tg} \beta)$. Здесь p_s - предел текучести на всестороннее сжатие; R - эксцентриситет эллиптического участка; α - коэффициент пропорциональный радиусу скругления между коническим и эллиптическим участками. Заметим, что $\sigma = -p$.

Скорость пластической деформации пропорциональна напряжению в текущий момент; напряженное состояние определяет мгновенные приращения компонент пластической деформации. Для определения приращений пластической де-

формации $d\varepsilon_{ij}$ используется функция $\Phi(\sigma_{ij})$, называемая пластическим потенциалом. В этом случае уравнения пластического течения имеют вид: $d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \cdot \partial\Phi/\partial\sigma_{ij}$, где $d\lambda \geq 0$ – некоторый неопределенный малый скалярный множитель. Полагается, что функция пластичности и пластический потенциал совпадают, т.е. $f = \Phi$. При этом выполняется ассоциированный закон пластического течения: $d\varepsilon_{ij}^p = d\varepsilon_{ij} = d\lambda \cdot \partial f/\partial\sigma_{ij}$.

Необходимость определения множества параметров, входящих в модель Друкера-Прагера, приводит к попыткам использовать более простые реологические модели для решения краевых задач технологической механики, в частности модель, описываемая лемниской Бернулли. Возможность применения этой модели показана в работах А.И. Рудского, N.P. Suh и др. Для решения задач, поставленных в диссертационной работе, введено уравнение лемнискаты (4) аппроксимирующей кривую текучести Друкера-Прагера для рассматриваемых типов металлических материалов – порошковых и пористых:

$$\tilde{\tau} = k \cdot \left[\sqrt{2(\tilde{\sigma} \cdot c - b)^{2a} + \frac{1}{4}} - (\tilde{\sigma} \cdot c - b)^{2a} - \frac{1}{2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где $\tilde{\tau}$, $\tilde{\sigma}$ - интенсивность касательных напряжений и среднее нормальное напряжение, представленные в безразмерной форме ($\tilde{\tau} = \tau/p_s$, $\tilde{\sigma} = \sigma/p_s$); $p_s(\theta)$ - предел текучести на гидростатическое сжатие; a , b , c - коэффициенты, принимающие значения $a = 1, b = 0, c = 1$ для порошковых материалов и $a = 2, b = \frac{1}{2}, c = \frac{1}{2}$ - для пористых материалов.

На рисунке 4 приведена трехмерная интерпретация (3/4 модели) условия текучести (4) для пористого тела, которому в пространстве главных напряжений соответствует тело вращения, ось симметрии которого совпадает с гидростатической осью σ равнонаклоненной к осям $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

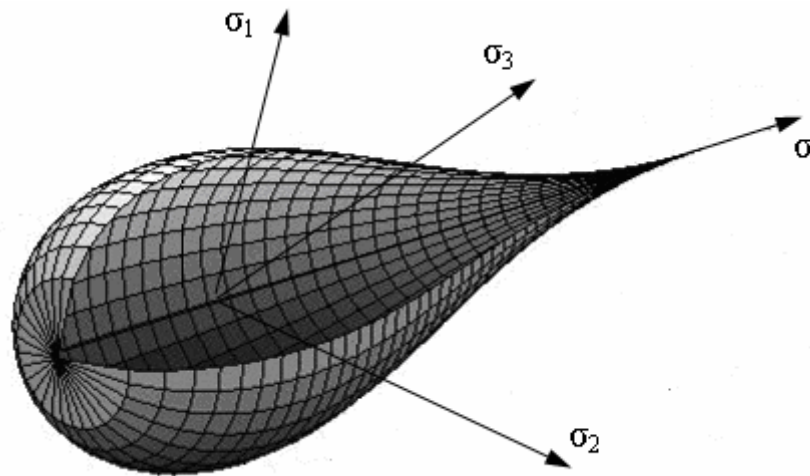
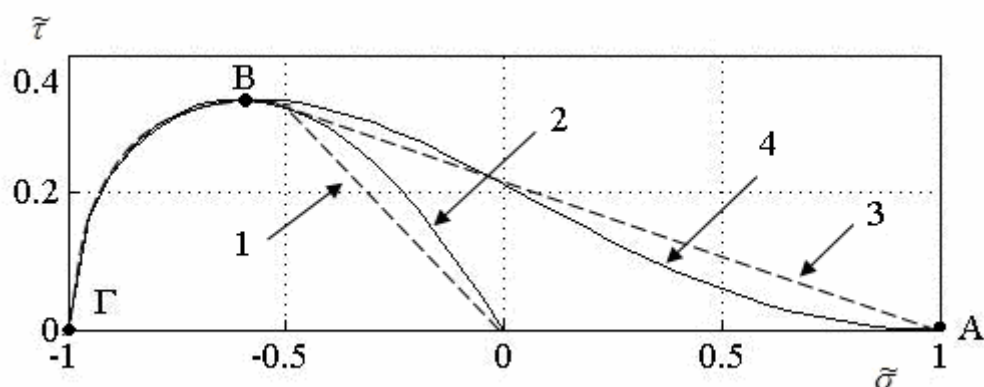


Рисунок 4 – Вид поверхности текучести в пространстве главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, заданной лемниской для пористого тела

На плоскости $\tilde{\tau} - \tilde{\sigma}$ ему соответствуют кривые 2 и 4 (рисунок 5). Видно, что кривые текучести заданной моделью Друкера-Прагера (1) – (3) и лемниской (4) одновременно пересекаются в трех точках, которые соответствуют пределу текучести на всестороннее растяжение (точка А), пределу текучести на всестороннее сжатие (точка Г) и пределу уплотнения (точка В). При этом в рамках диссертационной работы исследуются только процессы уплотнения, следовательно, напряженное состояние в деформируемом материале будет соответствовать точкам лежащим внутри эллиптического участка ВГ, где кривые, заданные уравнениями (4) и (2) близки друг к другу. Это позволяет сделать вывод о возможности применения лемнискаты (4) в качестве модели аппроксимирующей кривую текучести Друкера-Прагера с точностью приемлемой для инженерных расчетов для процессов уплотнения порошковых и пористых материалов.



1, 2 – порошковый материал; 3, 4 – пористый материал

Рисунок 5 – Сравнение условий текучести, заданных лемниской (сплошные линии) и кривой текучести Друкера-Прагера (штриховые линии) на плоскости $\tilde{\tau} - \tilde{\sigma}$

Идентификация модели текучести, заданной лемниской (4), производилась на основе имитационного моделирования деформации ячейки представительного объема при помощи системы конечно-элементного анализа Abaqus. Схемы нагружения ячеек представительных объемов пористой (сферическая пора) и порошковой (многогранная пора) деформируемой среды показаны на рисунке 6.

Согласно модели неоднородного материала предполагали, что каждая деформируемая ячейка объемом Ω обладает кусочно-однородными свойствами. Частица деформируемого материала, заполняющая ячейку, имеет объем $\omega_f = \Omega - \omega_p$, где ω_p - объем поры. Деформируемый материал имеет идеально-упругопластические свойства. Внешняя поверхность ячейки $S = S_F \cup S_V$ нагружается системой поверхностных сил $\mu F = \{\mu F_i\}$, где μ - возрастающий от нуля множитель.

В результате численных экспериментов определили зависимость (5) пластических модулей при гидростатическом сжатии p_s^* и сдвиге ячейки τ_s^* представительного объема от относительной пористости. Результаты численного эксперимента для процессов деформирования ячеек представительного объема аппроксимиро-

вали следующими уравнениями:

$$\frac{p}{\tau_s} = \alpha \cdot \ln \theta + \beta, \quad \frac{\tau_s^*}{\tau_s} = 1 - \theta^\varphi \quad (5)$$

где p - давление прессования; τ_s^* - предел текучести на сдвиг пористого материала; θ - пористость; τ_s - предел текучести на сдвиг материала в беспористом состоянии; α , β , φ - коэффициенты аппроксимации, приведены в таблице 1.

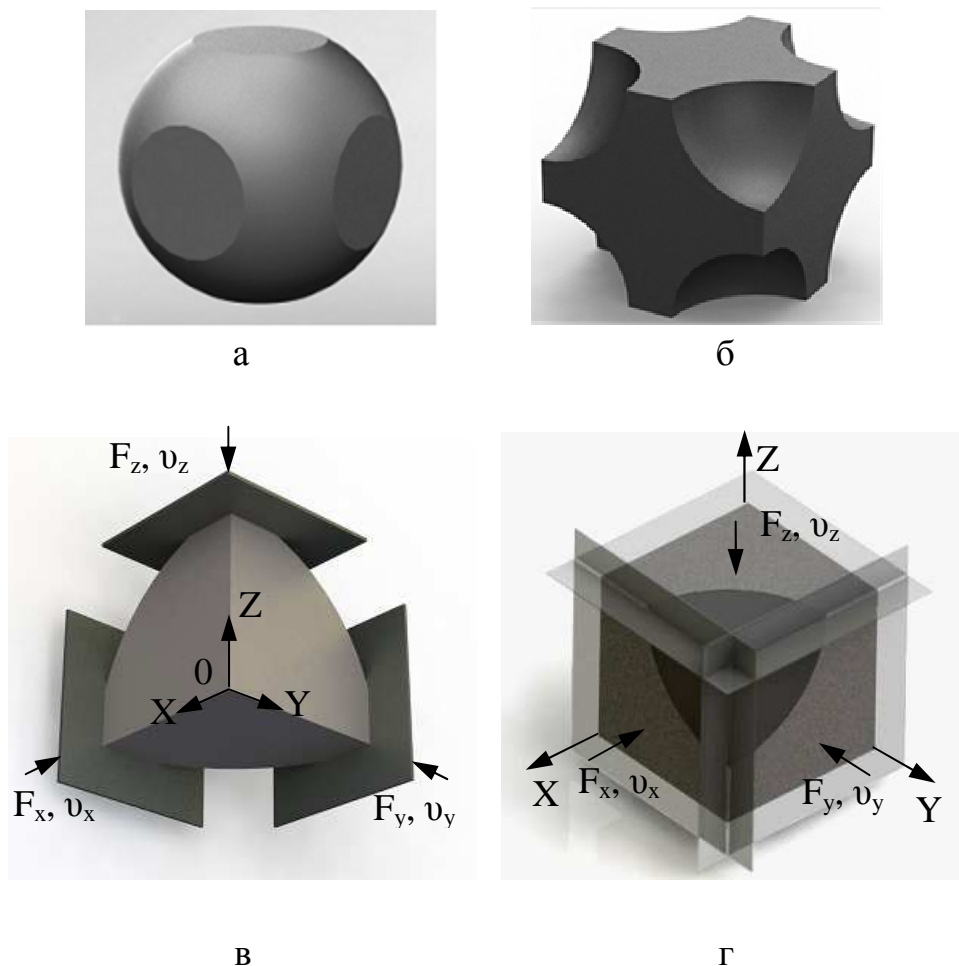
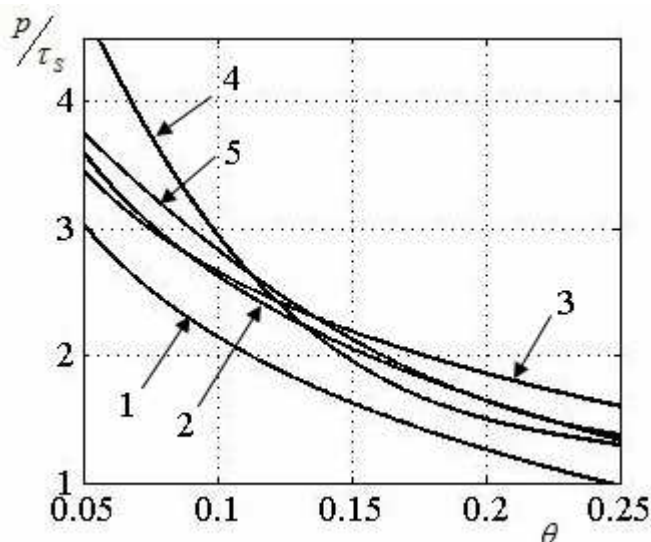


Рисунок 6 – Модели и схемы нагружения ячеек представительных объёмов пористой (б, г) и порошковой (а, в) деформируемой среды

Таблица 1 – Коэффициенты аппроксимации функций (5)

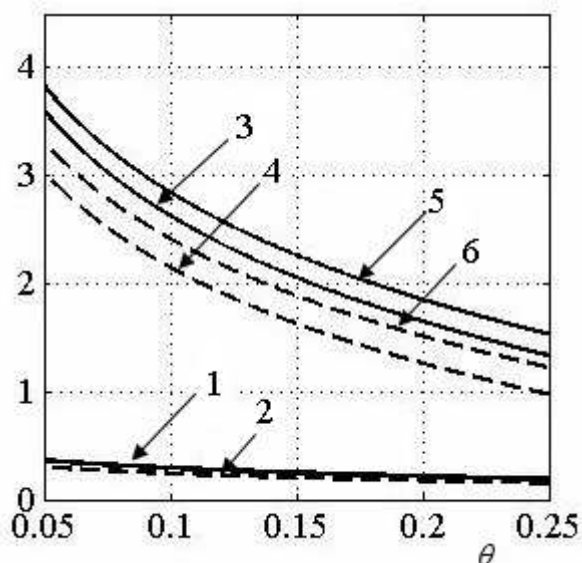
Состояние деформируемой среды	Всестороннее равномерное сжатие		Прессование в закрытой пресс-форме		Чистый сдвиг
	α	β	α	β	
Пористая	-1,41	-0,62	-1,43	-0,45	0,15
Порошковая	-1,28	-0,8	-1,3	-0,58	0,12

Результаты расчета по уравнениям (5) представлены на рисунках 7–8.



1 – многогранная; 2 – сферическая; 3 – расчет А.П. Полякова;
4 – расчет Б.А. Друянова; 5 – расчет А.Э. Александра

Рисунок 7 – Зависимость давления p/τ_s при всестороннем равномерном сжатии от пористости θ для пор различной формы



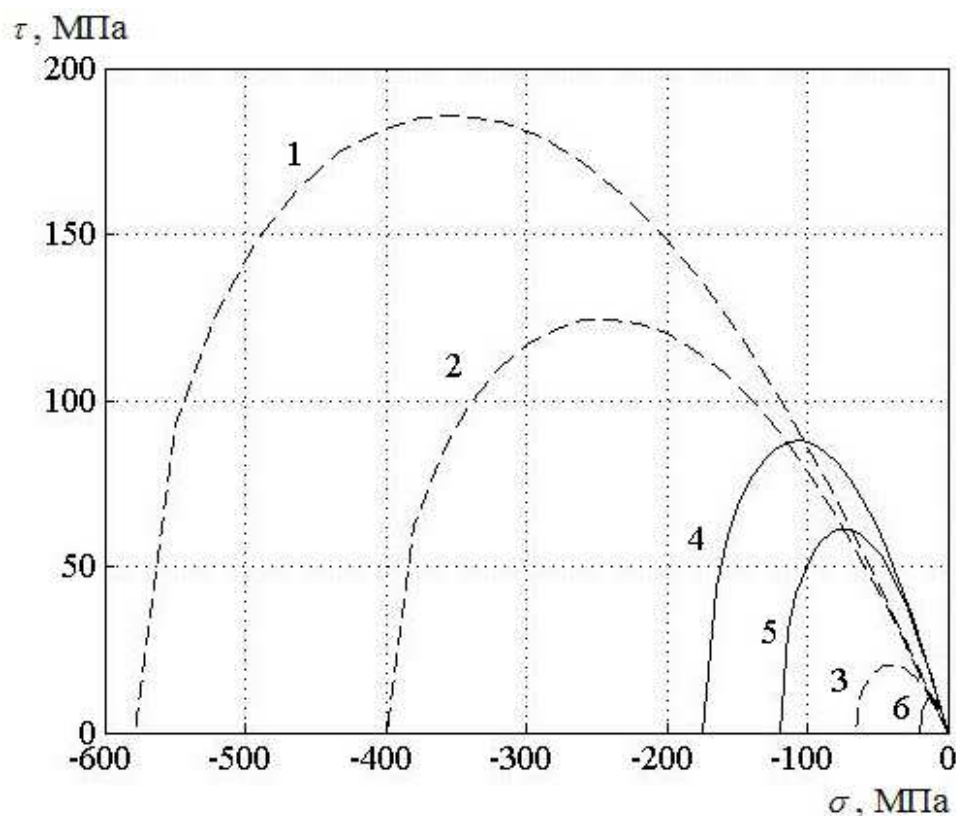
1, 2 – чистый сдвиг τ_s^*/τ_s ; 3,4 – всестороннее равномерное сжатие p_s^*/τ_s ;
5, 6 – сжатие в закрытой пресс-форме p/τ_s

Рисунок 8 – Зависимости пределов текучести для пористого (сплошные линии) и порошкового (штриховые линии) материала от пористости θ

Для сравнения на рисунке 7 приведены данные работ Б.А.Друянова, А.П.Полякова и А.Э.Александрова. Отметим, что все кривые имеют качественно схожий характер. Наименьшее давление необходимо при уплотнении порошкового материала с порами многогранной формы. Наибольшее давление получено для пористого материала с порами сферической формы. Разница в давлениях, необходи-

мых для уплотнения пористых и порошковых материалов при всестороннем равномерно сжатию достигает 27% при $\theta = 0,25$ и 15% при $\theta = 0,05$.

Выполненные экспериментальные исследования и компьютерное моделирование процессов пластического деформирования ячеек представительных объемов позволили определить кривые текучести для порошков меди ПМС-1, титановой губки и сплава ВТ22, заданные лемнискатою (рисунок 9).



1,4 – порошок ВТ-22; 2,5 – титановая губка ТГ-100; 3,6 – порошок ПМС-1
Рисунок 9 – Кривые текучести, заданные лемнискатою, для пористости $\theta = 0,2$ (штриховые линии) и пористости $\theta = 0,4$ (сплошные линии)

Определены параметры c , m , n , d , $tg\beta$ в условиях текучести модели Друкера-Прагера (таблица 2) для порошков ПМС-1, ВТ-22 и титановой губки ТГ-100. На основе полученных условий текучести осуществлено имитационное моделирование процесса формования детали сложной формы из металлического порошка на примере медного роторного кольца (рисунок 10,а), предназначенного для электродвигателей переменного тока. Результаты моделирования показаны на рисунке 10,б.

Исследовано влияние пластификатора на давление прессования и равномерность распределения относительной плотности по объему прессовки. Относительная плотность вычисляется как: $\frac{\rho_{\min} - \rho_{\max}}{\rho_{\max}}$ (разница между максимальной и минимальной плотностью, отнесенная к максимальной). Показано, что при формовании детали происходит изменение плотности деформируемого материала, зависящее от напряжённо-деформированного состояния в различных частях прессовки. Определено

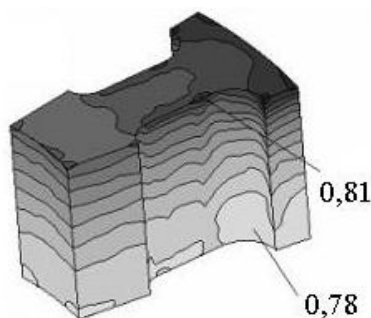
влияние сил трения на процесс формования меди с пластификатором, в качестве которого использовали стеарат цинка. Показано, что повышение содержания стеарата цинка в медном порошке до 0,7% снижает давление прессования на 12%, а неравномерность распределения относительной плотности с 0,28 до 0,02. Результаты моделирования позволили выбрать оптимальное (0,5-0,7%) количество пластификатора.

Таблица 2 – Параметры поверхности текучести Друкера-Прагера для порошкового материала

Материал порошка	Пористость θ	c	m	$\text{tg } \beta$	n	d
ПМС-1	0,2	47	19	0,4	0,19	0
	0,4	9	11	0,99	0,09	0
губка Ti	0,2	280	120	0,39	1,1	0
	0,4	70	50	0,86	0,6	0
BT-22	0,2	398	180	0,46	1,83	0
	0,4	80	94	1,04	0,83	0



а



б

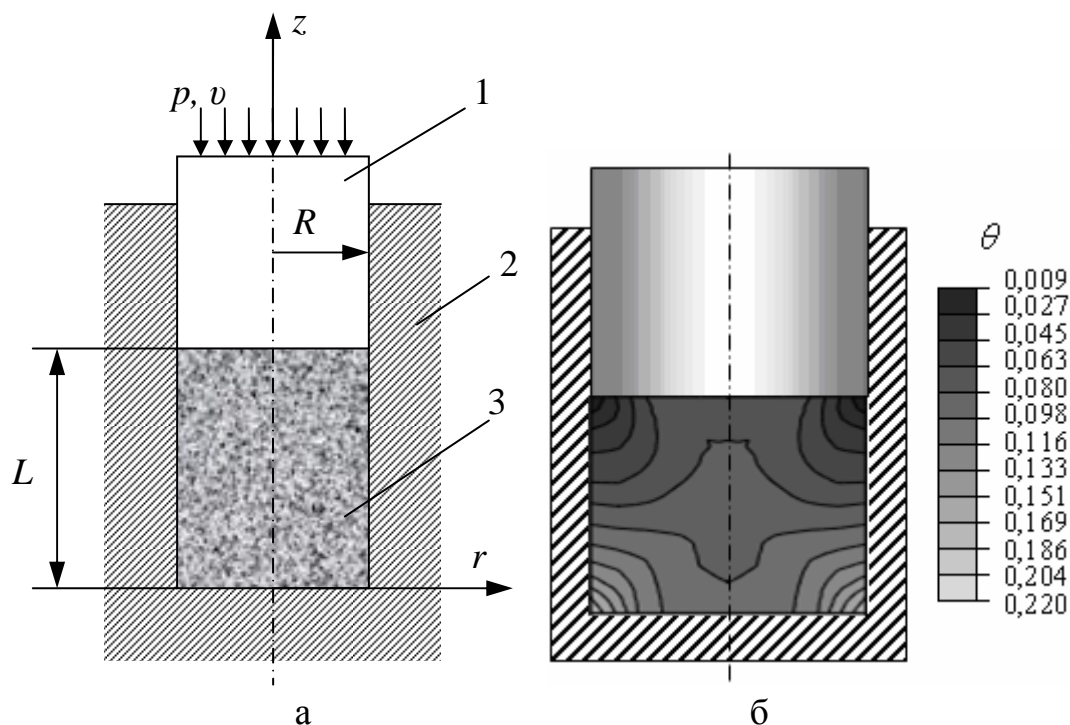
Рисунок 10 – Вид прессуемой заготовки (а) и распределение относительной плотности по сечению сегмента заготовки (б) при содержании пластификатора 0,6% по массе

Четвертая глава посвящена применению разработанного метода идентификации для моделирования процессов прессования и выдавливания титановой губки.

Для исследования процесса и оценки влияния легирования водородом титановой губки на ее компактируемость, выполнено имитационное моделирование прессования титановой губки в закрытом осесимметричном контейнере. В качестве модельного материала использовался отсев титановой губки марки ТГ-100 (фракция <2мм), близкой по составу техническому титану BT1-0 не содержащий водород и отсев титановой губки с содержанием водорода 0,5% по массе. Радиус прессуемого брикета $R=5\text{мм}$; начальная высота брикета $L=17\text{мм}$. Схема процесса прессования

показана на рисунке 11,а. Здесь обозначены: R – радиус заготовки, L – высота пористой массы, p – давление прессования, v – скорость прессования.

Модель внешнего трения имеет вид: $\tau_k^* = f \tau_s (1 - \theta_n)$, где f – коэффициент пропорциональности в законе трения Зибеля; τ_s – предел текучести компактного (беспористого) материала при сдвиге; $\theta_n = S_n/S$ – относительная поверхностная пористость; S_n – поверхностная площадь пор; S – площадь поверхности контакта пористого материала.



1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – титановая губка

Рисунок 11 – Схема процесса прессования (а) и распределение пористости θ в сечении заготовки из титановой губки при достижении средней пористости брикета

$$\theta=0,11 \text{ и степени деформации } \varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = 0,33 \text{ (б)}$$

Неоднородное распределение пористости по объему брикета (рисунок 11,б) обусловлено затратой усилия прессования на преодоление внешнего трения прессуемой массы о контактирующие с ней поверхности элементов пресс-формы.

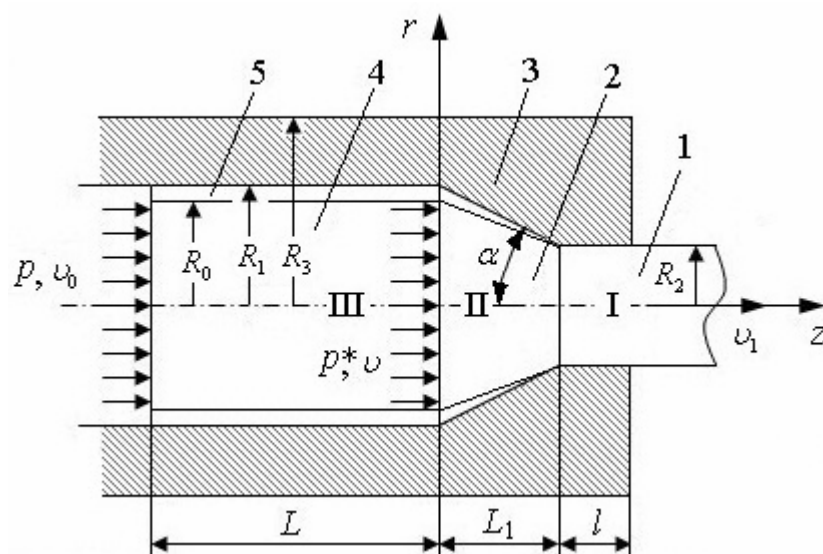
Для расчета давления, необходимого для сжатия титановой губки, с учетом влияния сил трения, действующих на стенках пресс-формы, получено следующее соотношение:

$$\frac{p}{\tau_s} = 0,58 + 1,3 \cdot \ln \theta + f \frac{L}{2R},$$

где p – давление прессования; θ – пористость; τ_s – предел текучести на сдвиг материала в компактном состоянии; f – коэффициент пропорциональности в законе тре-

ния Зибеля, установленный для контактной поверхности; L - длина заготовки в контейнере; R - радиус заготовки.

Рассматривается процесс полунепрерывного выдавливания заготовок из предварительно спрессованной титановой губки в режиме гидродинамического трения. При этом актуальным вопросом является оценка энергосиловых параметров процесса и определение пористости выдавленных прутков. Схема процесса полунепрерывного выдавливания показана на рисунке 12. Здесь обозначены: R_0 – радиус заготовки, R_1 – радиус цилиндрической части матрицы, R_2 – радиус выдавленного прутка, R_3 – радиус внешней стенки матрицы, α – угол конуса матрицы, L – длина цилиндрической части матрицы, L_1 – длина конусной части матрицы, l – длина калибрующего пояска.



1 – задний конец прутка; 2 – пресс-остаток; 3 – матрица;
4 – брикет; 5 – смазка

Рисунок 12 – Схема полунепрерывного выдавливания

Поставленная задача реализовывалась путем решения серии вычислительных экспериментов. Задача решалась в цилиндрической системе координат r, φ, z . Значения параметров угла матрицы 2α и вытяжки μ изменялись в интервале $2\alpha = 40 \div 100^\circ$; $\mu = 2 \div 8$. Пористость заготовки θ_3 изменялась в интервале $\theta_3 = 0,02 \div 0,2$. Значения пористости пресс-остатка θ_{II} малы, и лежат в диапазоне $0 \leq \theta_{II} \leq 0,02$.

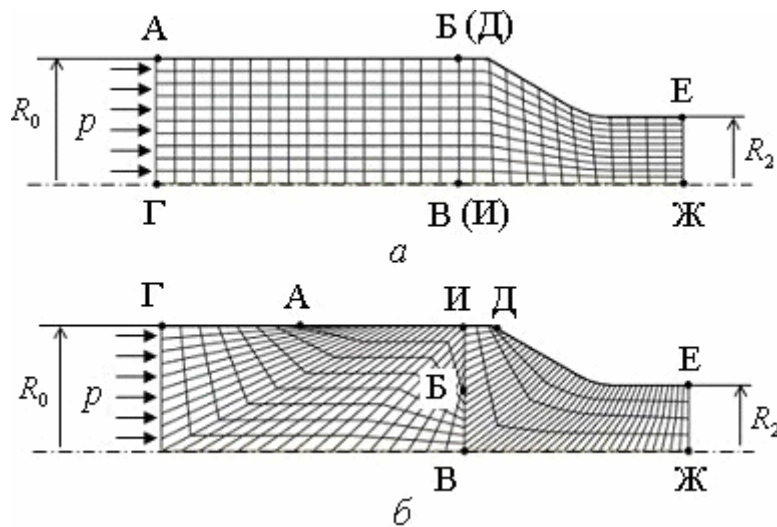
Так как интенсивность касательных напряжений τ слоя смазки много меньше предела текучести выдавливаемой заготовки, то в рассматриваемом случае контактные касательные напряжения полностью определяются механическими свойствами смазочного слоя. Для установившегося интенсивного течения смазки в узких зазорах предполагали, что контактные касательные напряжения равны пределу текучести на сдвиг материала смазки $\tau = \tau_{sc}$.

Для расчета давления смазки на входе в очаг деформации применена формула

$$\frac{q}{\sigma_{sc}} = 2 \frac{\tau}{\sigma_{sc}} \frac{L}{R_0} \left(\frac{R_1}{R_0} - 1 \right)^{-1},$$

где q – давление вещества смазки в слое интенсивного течения; σ_{sc} – предел текучести смазки; τ – интенсивность касательных напряжений смазки.

Указанный процесс характеризуется сильным искажением сетки в области контакта заготовки и пресс-остатка, вследствие неравномерности распределения скоростей истечения материала на различных участках очага деформации. Для имитационного моделирования полунепрерывного выдавливания прутков предложен способ построения сетки конечных элементов, позволяющий получать непрерывное поле скоростей как в деформируемой заготовке и пресс-остатке, так и на границе их раздела (рисунок 13).

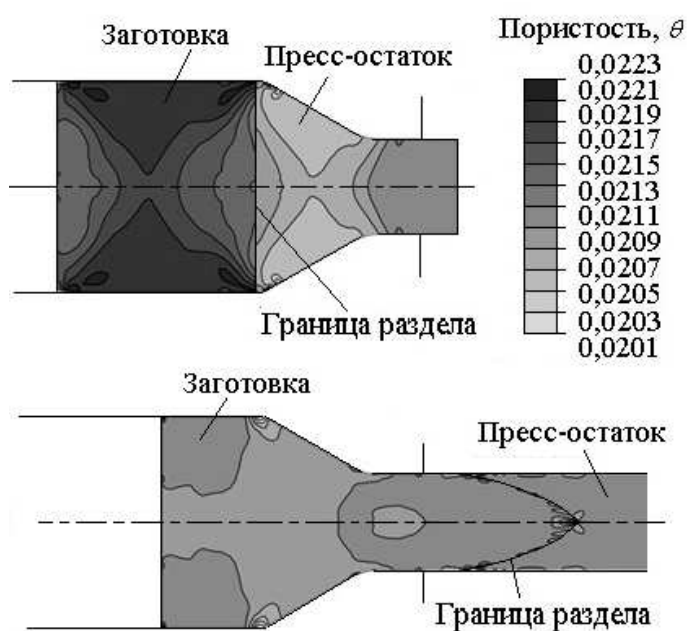
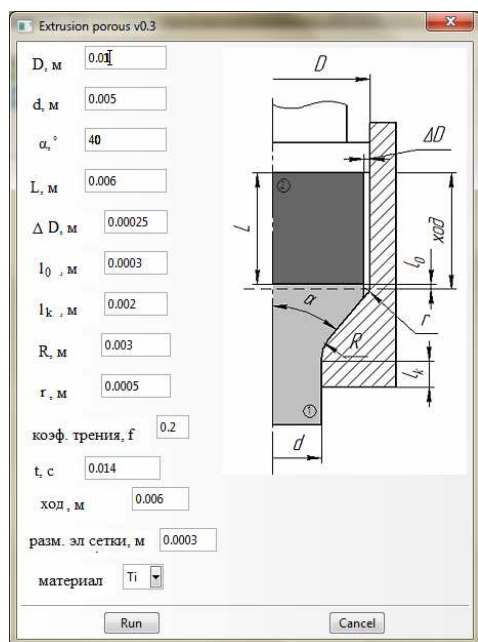


а – обычная схема; б – предлагаемая схема

Рисунок 13 – Схема построения сетки конечных элементов

При осесимметричной постановке задачи область построения сетки четырехугольных билинейных конечных элементов САХ4R описывается четырьмя вершинами: для брикета – А, Б, В, Г; для пресс-остатка – Д, Е, Ж, И (рисунок 13,а). Вершины перемещаются таким образом, чтобы отрезки ГА и ИД находились на образующей заготовки радиусом R_0 в цилиндрической части матрицы, причем $ГА \leq АИ$; отрезок БВ, находящийся на линии стыка заготовки и пресс-остатка, удовлетворял условию $БВ \leq R_2$ (рисунок 13, б).

Разработано программное обеспечение для параметрического моделирования полунепрерывного выдавливания заготовок из порошкообразного металлического сырья. Модуль написан на языке программирования Python и может быть интегрирован в систему конечно-элементного анализа Abaqus. Пользователем задаются параметры геометрии инструмента, граничные условия и модель материала (рисунок 14, а). Результаты моделирования показаны на рисунке 14,б.



а

б

Рисунок 14 – Интерфейс программного модуля (а) и результаты расчета распределения пористости θ по сечению заготовки (б)

Исследован механизм залечивания крупных пор выдавливаемого пластически сжимаемого материала, не попадающих в доверительный интервал распределения размеров дефектов по сечению заготовки (рисунок 15). Видно, что поры закрываются более интенсивно там, где наблюдаются значительные деформации сдвига, то есть на периферии выдавливаемой заготовки. В центре прутка существует значительная вероятность остаточной пористости.

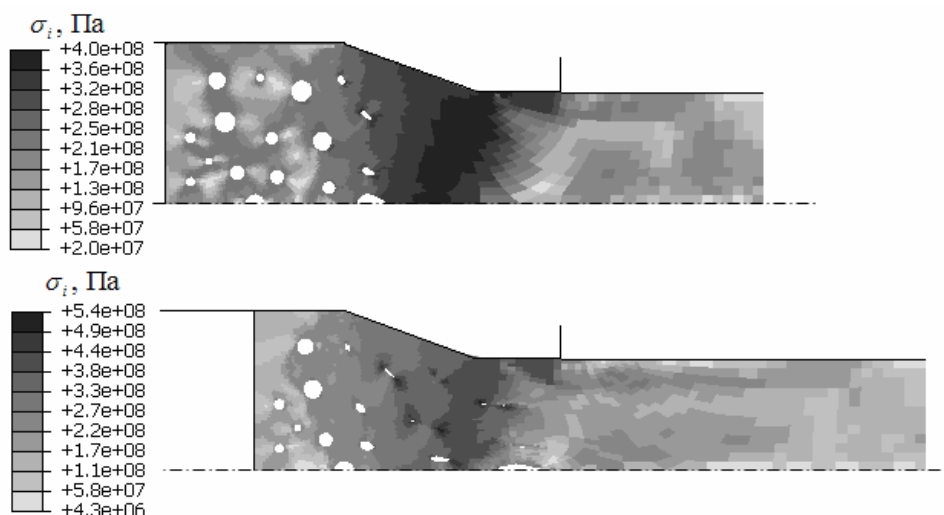


Рисунок 15 – Результаты моделирования процесса залечивания крупных пор

В результате численного эксперимента с использованием имитационной модели процесса полунепрерывного выдавливания установили аппроксимирующие за-

зависимости усилия выдавливания $p/(\sqrt{3}\tau_s)$ и пористости θ выдавленных заготовок от основных параметров процесса, к которым отнесены угол рабочей матрицы α и вытяжка μ :

$$p/\sqrt{3}\tau_s = -2,15 + 0,05\alpha + 1,21\mu - 14,16\alpha^2 - 0,06\mu^2,$$
$$\theta = 0,03 - 2,5 \cdot 10^{-5}\alpha - 6,04 \cdot 10^{-5}\mu - 2,5 \cdot 10^{-7}\alpha^2 - 1,28 \cdot 10^{-4}\mu^2,$$

где значения параметров угла матрицы α и вытяжки μ изменялись в интервале $\alpha = 20 \div 50^\circ$; $\mu = 2 \div 8$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика идентификации модифицированного условия текучести Друкера-Прагера с применением модели среды с регулярной структурой, позволившая обеспечить минимальное количество экспериментов и повысить точность при определении пластических модулей порошковых и пористых металлических материалов. Введено новое уравнение, аппроксимирующее кривую текучести Друкера-Прагера, определены критерии его приближения для рассматриваемых типов металлических материалов.

2. Предложены новые зависимости пределов текучести при чистом сдвиге, всестороннем равномерном сжатии и сжатии в закрытой пресс-форме, полученные в результате решения краевых задач пластического деформирования ячеек представительных объемов порошковых материалов с многогранной порой и пористых материалов со сферической порой с учетом изменения пористости в процессе пластической деформации. Достоверность полученных соотношений подтверждается сравнением результатов с известными из литературы теоретическими и экспериментальными данными. Показано, что форма пор может существенно влиять на энергосиловые параметры процесса деформирования.

3. В результате имитационного моделирования полунепрерывного гидромеханического выдавливания прутков титановой губки усовершенствована конструкция матричного узла устройства, что позволило обеспечить устойчивый режим гидромеханического трения за счет поддержания необходимого бокового давления смазки. Установлено влияние угла конусности матрицы и степени вытяжки на давление выдавливания и остаточную пористость прутков титановой губки.

4. Для параметрического моделирования процесса полунепрерывного гидромеханического выдавливания создан программный модуль, интегрируемый в систему конечно-элементного анализа Abaqus, позволяющий варьировать основные конструктивные параметры деформирующего инструмента. Предложен способ построения сетки конечных элементов, позволяющий строить непрерывное поле скоростей как в деформируемой заготовке и пресс-остатке, так и на границе их раздела.

5. На основе моделирования процесса прессования титановой губки в условиях неравномерного всестороннего сжатия полиуретаном Duothan QA965 показано, что за счет использования полиуретановых бандажей с различной объемной сжимаемостью, при одинаковых радиальных напряжениях в стенках контейнера, предлагаемая схема позволяет развивать большие средние нормальные давления на заготовку по сравнению с классической схемой гидростатического прессования.

6. Установлены закономерности формирования пористости титановой губки легированной водородом при прессовании в закрытой пресс-форме. Показано, что за счет действия контактных касательных напряжений происходит неоднородное распределение средних нормальных напряжений по сечению заготовки. При этом разница между экстремальными значениями пористости по высоте прессовки, при средней пористости брикета 0,11 и степени деформации 0,33 может составлять более 20%. Зоны экстремальных напряжений возникают на периферии пресс-формы, в слоях, прилегающих к деформирующему инструменту и дну контейнера.

7. Для процесса прессования заготовки сложной формы из порошковой меди марки ПМС-1 показано, что с точки зрения снижения энергосиловых параметров прессования без существенного ухудшения механических свойств заготовок содержание стеарата цинка можно считать оптимальным в пределах 0,5-0,7%.

8. Введены уравнения для расчета величины утечки рабочей жидкости через лабиринтные уплотнения плунжерного гидростата, в которых определены коэффициенты, учитывающие конусность щели при деформации стенок плунжерной пары. Показано, что деформация плунжерной пары при высоких перепадах давления оказывает значительное влияние на величину утечки жидкости. Для случая концентричного расположения плунжера в гильзе при давлении в камере гидростата 200 МПа разница в определении расхода рабочей жидкости с учетом деформации плунжерной пары составляет 20%.

9. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, приведенных в настоящей работе, могут быть использованы при разработке новых и совершенствовании существующих схем пластического деформирования заготовок из порошковых и пористых металлических материалов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях, входящих в список ВАК РФ:

1. **Березин, И.М.** Компьютерное моделирование процесса формования заготовки сложной формы из порошка [Текст] / И.М.Березин, А.Г.Залазинский, А.П.Поляков // Заготовительные производства в машиностроении. - 2012. - №1. - С.26-29.

2. **Березин, И.М.** Устройство для идентификации реологических характеристик пластически сжимаемых материалов [Текст] / И.М.Березин, А.Г.Залазинский,

А.П.Поляков // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. - 2013. - №3. - С.33-37.

3. **Березин, И.М.** Определение условий пластического течения некомпактных материалов [Текст] / И.М.Березин, А.Г.Залазинский // Фундаментальные исследования. Технические науки. - 2013. - №8. - С.19-23.

Основные публикации в научных изданиях, не входящих в список ВАК РФ:

1. **Березин, И.М.** Создание экспериментальной установки для гидростатического сжатия пористых материалов [Текст] / И.М.Березин // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. - №2. - С.37-51.

2. **Березин, И.М.** Моделирование процесса выдавливания пластически-сжимаемой массы [Текст] / И.М.Березин, А.Г.Залазинский, А.В. Долматов // Рациональное природопользование и передовые технологии материалов: труды ежегодной производственно-практической конференции. – Екатеринбург, 2013. – С.83-86.

3. **Березин, И.М.** Методика экспериментального определения параметров порошковых материалов [Текст] / И.М.Березин, А.Г.Залазинский // Инновационный потенциал молодежи – вклад в развитие ОАО «Уралэлектромедь»: сборник докладов третьей молодежной научно-практической конференции. – Верхняя Пышма, 2010. - С.116.

4. **Березин, И.М.** Моделирование процесса прессования пористого тела [Текст] / И.М.Березин, А.Г.Залазинский // Механика микронеоднородных материалов и разрушение: тезисы докладов VI Российской научно-технической конференции. - Екатеринбург, 2010. - С.108.

5. **Березин, И.М.** Создание экспериментальной установки для гидростатического сжатия некомпактных материалов [Текст] / И.М.Березин // XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред: тезисы докладов. - Пермь, 2013. - С.46.

6. **Березин, И.М.** Моделирование процесса полунепрерывного выдавливания пористой заготовки [Текст] / И.М.Березин // Инженерные Системы – 2013: материалы международного форума. - Москва, 2013. - С.32.

7. **Березин, И.М.** Моделирование процессов обработки давлением высокопрочных порошков титана [Текст] / И.М.Березин [и др.] // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы для молодых ученых. – Екатеринбург, 2013. - С. 355-360.

8. Пат. 129858 Российская Федерация, МПК В 21 J 5/04 (2006.01), В 21 J 13/02 (2006.01). Устройство для полунепрерывного гидромеханического прессования [Текст] / Залазинский А.Г. [и др.]; заявители и патентообладатели Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук. - № 2012142103/02; заявл.02.10.12; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 19 – 2 с.: ил.