

На правах рукописи



ДОАН ВАН ФУК

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ
ЗАГОТОВОК ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ**

Специальность: 05.16.06 – Порошковая металлургия
и композиционные материалы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Цеменко Валерий Николаевич, заведующий кафедрой технологии и исследования материалов ФГАОУ ВО «СПбПУ» (г. Санкт-Петербург)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук **Соколов Юрий Алексеевич**,

заместитель технического директора ПАО «Электромеханика» (г. Ржев)

кандидат технических наук, доцент **Фармаковский Борис Владимирович**,

ученый секретарь Института ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей» (г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация:

ЗАО «Завод «Композит» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «22» декабря 2016г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан " " октября 2016г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.03
кандидат технических наук



Климова О.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Порошковая металлургия позволяет получать легкие материалы на основе алюминия с высокими и, даже, уникальными физико-механическими свойствами, которые невозможно обеспечить традиционными методами. Алюминиевые композиционные материалы, получаемые методом порошковой металлургии, широко применяются в современных отраслях промышленности, таких как авиастроение, космическая техника, ядерная энергетика, приборостроение. Однако при создании этих материалов возникают определенные трудности, связанные, в основном, с химической активностью алюминиевого порошка – наличием на поверхности частиц прочной оксидной пленки. Кроме того, введение в алюминиевую матрицу частиц с низким коэффициентом термического расширения, высоким модулем упругости (кремний, оксиды, нитриды и т.д.) сильно ее упрочняет. Поэтому высокие физико-механические свойства этих материалов во многом зависят от технологических процессов их компактирования, позволяющих разрушать оксидные пленки и равномерно распределять упрочнитель в объеме композиционного материала. Перспективными для уплотнения подобных материалов являются методы пластической деформации в незамкнутых объемах, в частности метод горячей экструзии (ГЭ). Особенностью процессов ГЭ является совмещение воздействия на заготовку повышенного гидростатического давления и больших сдвиговых деформаций в очаге деформации. В ряде случаев целесообразно помещать порошок в металлические капсулы.

Несмотря на то, что процесс ГЭ порошков широко применяется в практике порошковой металлургии, до настоящего времени не выполнен комплексный анализ влияния различных параметров на процесс уплотнения и деформации порошковых заготовок. Параметры процесса ГЭ, в основном, подбираются опытным путем, который является трудоемким и дорогим. Для решения подобных задач в настоящее время целесообразно применять методы математического моделирования с применением программных пакетов на основе метода конечных элементов (МКЭ). Однако их использование при решении задач, связанных с деформированием порошковых и пористых материалов, является относительно новым направлением и принципиально требует дополнительной адаптации, а также экспериментальной проверки адекватности полученных результатов.

Для проведения математического моделирования процессов деформирования порошковых материалов необходимо знать реологические характеристики материала. Методика определения реологических характеристик порошковых материалов основывается на экспериментальном изучении их поведения при различных схемах нагружения. Однако выполнение экспериментальных исследований для определения реологических характеристик иногда невозможно, так как получение макрообразцов из металлических сферических порошков с высоким уровнем прочности для испытания проблематично. В этом случае имеется возможность исследовать поведение порошковых материалов на основе анализа деформации представительного элемента порошкового тела, используя условие текучести Мизеса и известные механические характеристики материалов в беспористом состоянии. Такой анализ также можно осуществлять методами математического моделирования, что позволяет установить зависимость реологических характеристик порошкового тела от плотности.

Цель работы: Разработка компьютерных моделей уплотнения и деформации сферических порошков и определение конструктивно-технологических параметров процесса горячей экструзии заготовок из композиционных материалов на основе алюминия.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи:**

1. Анализ возможностей применения различных программных пакетов для моделирования процессов деформирования порошковых и пористых материалов.
2. Адаптация реологической модели Друкера-Прагера, встроенной в программный пакет ABAQUS, для моделирования процессов уплотнения и пластического деформирования порошковых материалов в широком диапазоне изменения плотности.
3. Определение гранулометрического состава и начальной плотности упаковки порошков алюминия сферической формы, при которых уплотнение заготовки осуществляется пластическим деформированием материала частиц.
4. Разработка расчетно-экспериментальной методики определения реологических характеристик порошкового и пористого тела по известным механическим характеристикам материала частиц и матричного материала на основании анализа процесса деформации их идеализированной модели.
5. Математическое моделирование процесса ГЭ заготовок из порошковых композиционных материалов на основе алюминия в капсуле; анализ влияния конструктивных параметров капсулы и технологических режимов деформации на условия компактирования дисперсно-упрочненного порошкового материала на основе алюминия.
6. Практическая реализация процесса ГЭ заготовок из дисперсно-упрочненных порошков алюминия в капсуле. Исследование структуры и механических свойств композитов. Разработка практических рекомендаций по осуществлению технологических процессов получения заготовок из дисперсно-упрочненных композиционных материалов.

Научная новизна

1. Разработана расчетно-экспериментальная методика определения реологических характеристик эллиптического условия текучести порошкового материала по известным механическим характеристикам материала частиц сферической формы на основании анализа процесса деформации идеализированной модели при схемах всестороннего сжатия.
2. Установлены аналитические зависимости реологических характеристик порошкового материала от плотности. Получены зависимости механических характеристик исследованных композиционных материалов на основе алюминия от относительной плотности для проведения математического моделирования процессов деформирования порошковых и пористых материалов.
3. Предложены аналитические формулы для определения параметров модели Друкера-Прагера порошкового и пористого материала различной плотности при известных механических характеристиках материала в беспористом состоянии.
4. Методом математического моделирования выполнен комплексный анализ влияния различных параметров на процесс уплотнения и деформации порошковых заготовок при горячей экструзии. Установлены количественные значения технологических параметров процесса ГЭ (вытяжка и угол конусности), геометрических параметров и механических свойств капсул на процесс уплотнения и деформацию композиционных материалов на основе алюминия.

Практическая значимость

1. Разработаны практические рекомендации для математического моделирования процесса уплотнения и деформации порошковых и пористых материалов на основе алюминия, включающего этапы выбора программного пакета, определения реологических характеристик исследованного материала и деформирования различными схемами нагружения.

2. Разработана подпрограмма на языке FORTRAN к программному пакету Aباqus, позволяющая обновлять в каждое приращение по времени расчета изменяющиеся в процессе деформации параметры порошковых и пористых материалов.

3. На основе математического моделирования разработаны рекомендации по проектированию оснастки и изготовлению капсул для практической реализации процесса ГЭ. Установлены основные параметры технологического процесса изготовления композиционных материалов из порошка алюминия методом ГЭ, включающего подбор фракционного состава порошкового композита и компактирование порошкового композиционного материала.

4. По расчетным конструктивно-технологическим параметрам процесса ГЭ экспериментально получены заготовки из композиционных материалов на основе алюминия заданных свойств; исследована их структура и механические свойства до и после дополнительной горячей пластической деформации.

Методы исследования. В работе применяли следующие методы исследования: компьютерное моделирование процессов пластической обработки пористых и порошковых материалов методом конечных элементов; экспериментальное исследование с применением современных средств измерений, оптической и электронной микроскопии; компьютерная обработка результатов эксперимента.

Личный вклад автора: в диссертации обобщены результаты исследований, полученные лично автором и в соавторстве. Все расчётно-экспериментальные исследования и программирование подпрограммы выполнены непосредственно автором. Проведение экспериментальных исследований осуществлялось совместно с сотрудниками кафедры ТИМ (СПбПУ). Постановка задачи исследования, обсуждение и интерпретация полученных результатов проводились совместно с научным руководителем д.т.н., профессором В. Н. Цеменко.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях: Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов XLIII неделя науки СПбПУ. СПб. 2014г.; XIV международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов». СПб. 2014г.; VI Международной научно-технической конференции «Новые перспективные материалы и технологии их получения». Волгоград. 2014г.; XXIV Международной научно-технической конференции «Metal 2015». Brno, Czech Republic, EU. 2015г.; XV Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии». СПб. 2015г.; Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов». СПб. 2016г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 8 – в рецензируемых журналах из перечня ВАК, в том числе 2 в изданиях, включенных в систему цитирования Skopus, 6 в трудах международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести основных глав, списка литературы из 80 наименований. Работа изложена на 178 страницах машинописного текста, содержит 137 рисунков, 25 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследований. Отражены научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведен литературно-аналитический обзор, рассмотрены основные методы получения порошка алюминия и его сплавов. Показано, что методами распыления можно получить порошок алюминия с частицами различных формы и размеров. При этом для деформационных процессов уплотнения целесообразнее использовать порошки алюминия и его сплавов с частицами сравнительно крупных размеров и сферической формы, поскольку такие порошки позволяют получать исходную максимальную плотность упаковки при минимальной доли включений оксидов на поверхности частиц.

Приведен анализ возможности компактирования порошковых материалов из алюминия и его сплавов методом экструзии. Показано, что для получения беспористых заготовок из порошковых композиций, а также развития метода экструзии в капсулах требуется решение ряда задач и уточнение технологических параметров процесса прессования заготовок через матрицу, которые в настоящее время целесообразно определять с применением метода компьютерного моделирования. Для успешной реализации этих методов необходимо иметь достаточно информации о поведении таких материалов при различных схемах нагружения.

Показано, что для определения реологических характеристик порошковых материалов возможно и целесообразно применять расчетный метод, основанный на анализе деформирования структурного элемента среды, сочетая его с экспериментальной проверкой процесса деформации образцов материала различной плотности. Разработка расчетно-экспериментальной методики определения реологических характеристик порошковых материалов требует дополнительных исследований и компьютерного моделирования процесса деформации представительного элемента порошкового и пористого тела.

Приведен обзор программных пакетов и реологических моделей, используемых для моделирования процессов уплотнения и деформации порошковых и пористых материалов.

Показано, что с использованием методов математического моделирования можно решать ряд задач, связанных с процессами деформирования компактных и композиционных материалов, однако при моделировании порошковых и пористых материалов существенные трудности возникают вследствие использования несоответствующего программного пакета на основе МКЭ и недостаточной информации о методах определения реологических характеристик этих сред.

Вторая глава посвящена анализу возможности применения различных программных пакетов на основе МКЭ для моделирования уплотнения и деформации порошковых материалов. Рассмотрены наиболее функциональные и известные программные пакеты: Ansys/Ls-Dyna версия 15.0, Abaqus версия 6.14 и Deform версия 10.2. Для этой цели смоделирован и экспериментально исследован процесс осадки алюминиевого порошка сферической формы марки АКВ-2.5 (ТУ 1791-99-043-2001) в

капсуле из материала АМг5 и процесс прессования этого порошка в закрытой матрице.

Сравнение результатов математического моделирования с экспериментальными данными показало, что для процесса осадки в капсуле (где плотность порошкового материала изменяется в сравнительно узком диапазоне) различие средней плотности между экспериментом и моделированием составляет 8.5% (для модели LS-DYNA), 12% (для модели DEFORM) и 1.5% (для модели ABAQUS). Программный пакет ABAQUS с моделью Друкера-Прагера позволяет более точно отразить процесс деформирования при осадке, так как учитывает возможное разрыхление порошкового материала в процессе осадки, что и было экспериментально установлено.

Результаты математического моделирования процесса прессования порошка в закрытой матрице (где относительная плотность порошкового тела изменяется в довольно широком диапазоне) с использованием программного пакета ABAQUS были сопоставлены с экспериментом. Характер послойного уплотнения при моделировании достаточно хорошо качественно воспроизводится экспериментально. Различие средней плотности между экспериментом и моделированием с использованием программного пакета ABAQUS составляет ~ 7%. При этом, чем шире интервал изменения плотности в процессе прессования, тем большее расхождение между результатами эксперимента и математического моделирования. Для схем деформирования порошковых заготовок, при которых интервал изменения плотности может лежать в широком диапазоне, целесообразно разработать подпрограмму к программному пакету ABAQUS, позволяющую обновлять в процессе деформации изменяющиеся параметры порошкового материала.

Третья глава посвящена разработке подпрограммы к программному пакету ABAQUS и реологической модели Друкера-Прагера, позволяющей автоматически обновить характеристики материала в процессе деформирования.

На рис. 1 показана геометрическая интерпретация поверхности текучести модели Друкера-Прагера на плоскости гидростатического давления и интенсивности напряжений Мизеса p - q .

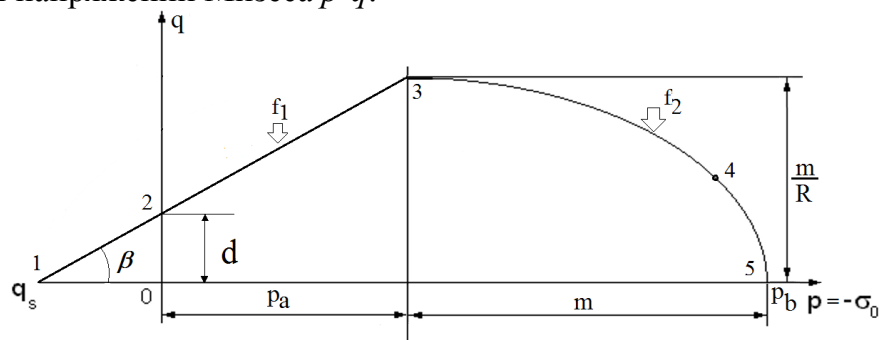


Рис. 1. Геометрическая интерпретация модели Друкера-Прагера в плоскости p - q

Предельная поверхность f_1 имеет уравнение:

$$f_1 = q - p \tan \beta - d = 0,$$

где: d – адгезия материалов (МПа), β – угол внутреннего трения материалов (градус). С деформированием материалов значения d и β изменяются.

Поверхность уплотнения f_2 имеет уравнение:

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

где: p_a – предел уплотнения, определяющее начальное гидростатическое давление, под действием которого материал начинает уплотняться (МПа);

R – параметр, характеризующий форму поверхности уплотнения;

$m = R(d + p_a \tan \beta)$ - функция состояния материала;

$p_b = p_a + m$ - предел текучести на всестороннее сжатие (МПа);

Параметры упругости E и ν и параметры поверхности текучести f являются единственными для текущего уровня уплотнения (относительной плотности). В стандартной постановке задачи пакет ABAQUS не может автоматически изменять параметры уплотняемого материала при расчете деформирования. Для устранения такого недостатка разработана подпрограмма на языке программирования FORTRAN, позволяющая обновлять локальные параметры материала в каждое приращение по времени. Принцип работы подпрограммы в виде блок-схемы представлен на рис. 2.

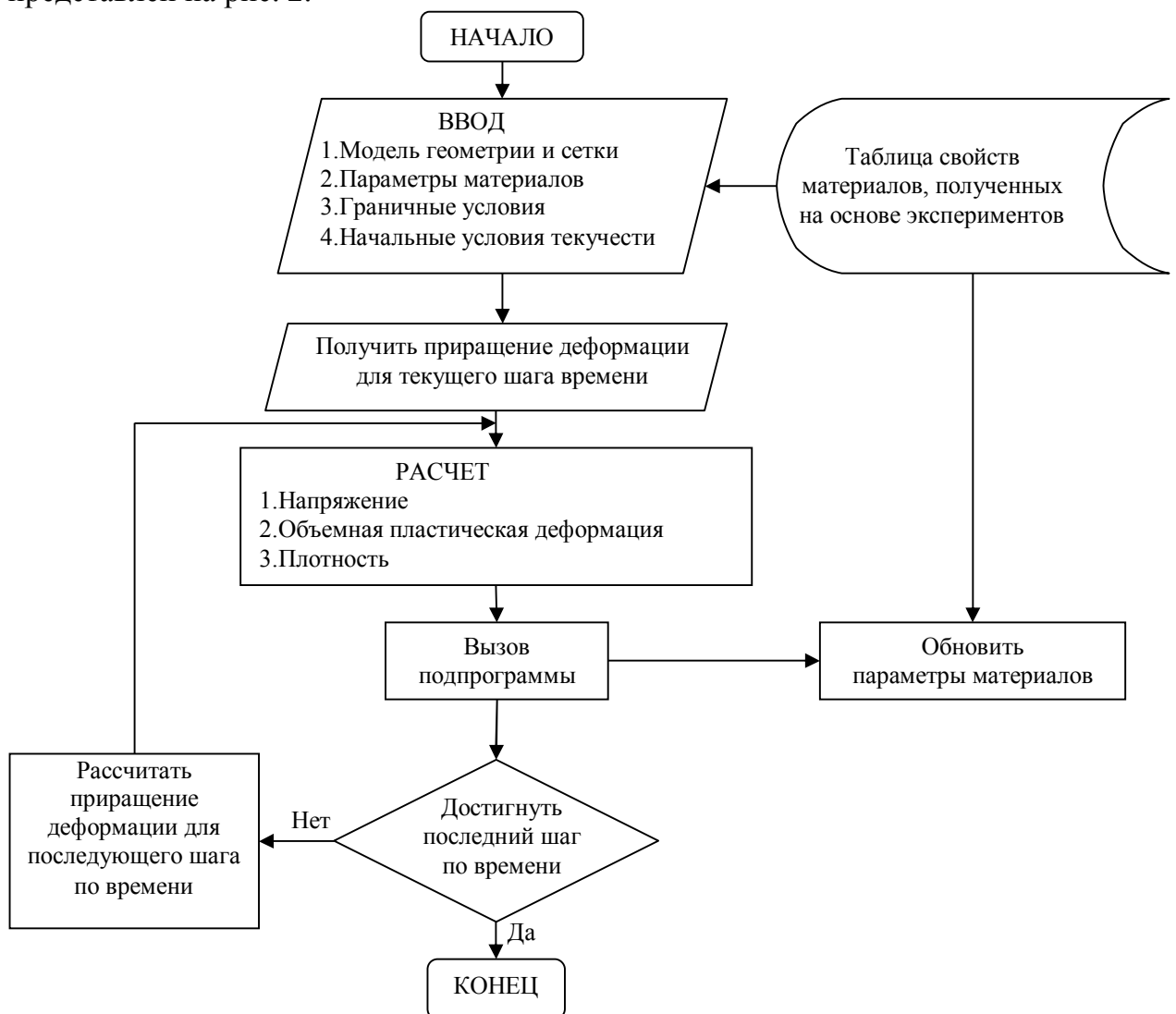


Рис. 2. Блок-схема работы подпрограммы

С использованием разработанной подпрограммы рассматривались некоторые технологические варианты уплотнения порошка алюминия АКВ2.5. На рис. 3 показано семейство поверхностей текучести Друкера-Прагера, полученных экспериментально в результате испытаний алюминиевого порошка АКВ-2.5.

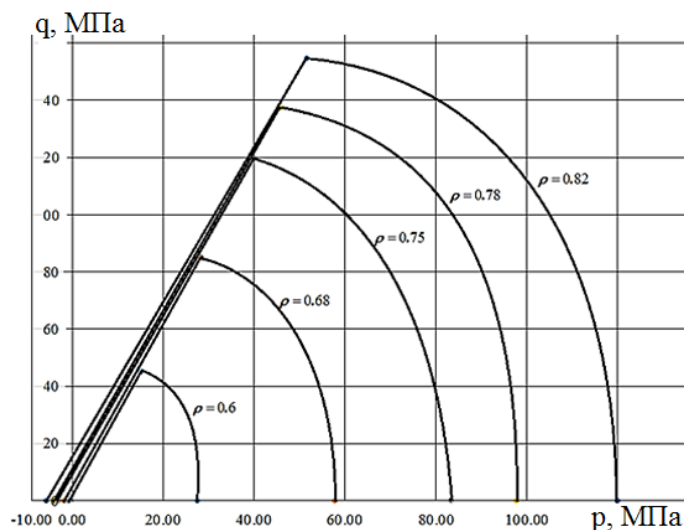


Рис. 3. Семейство поверхностей текучести в модели Друкера–Прагера, полученных на основе экспериментальных испытаний алюминиевого порошка АКВ-2.5

Сравнением результатов моделирования и практической реализации процесса осадки порошковых образцов из АКВ-2.5 в капсуле установлено, что различие плотности между экспериментом и моделированием составляет 0.8% для модели с использованием подпрограммы (рис.4).

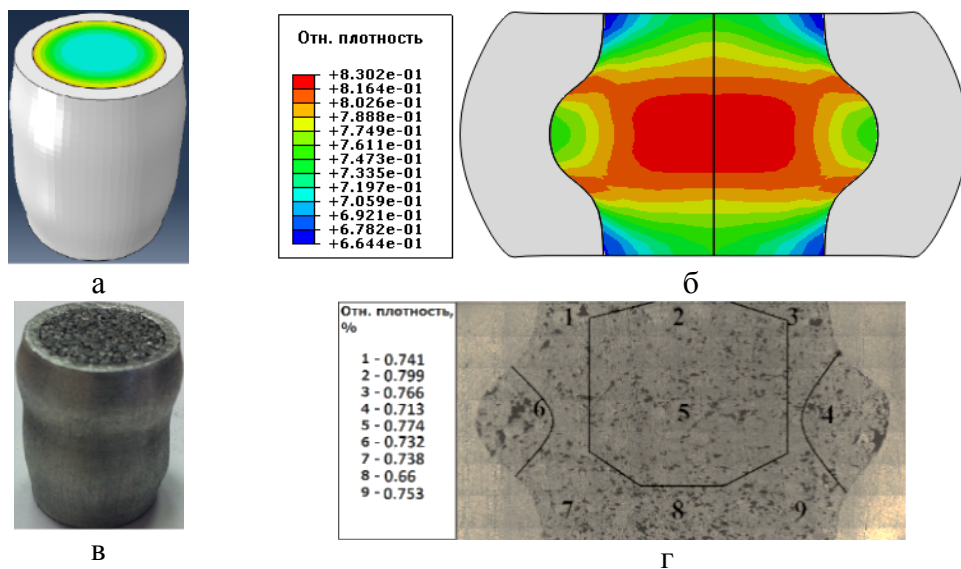


Рис. 4. Сравнение результатов моделирования процесса осадки с результатами эксперимента. (а, в – при толщине стенки капсулы 2 мм; б, г – 5 мм)

Сравнение результатов моделирования и экспериментов процесса прессования алюминиевых порошков в закрытой матрице показало, что разработанная модель с использованием подпрограммы позволила точнее описывать уплотнение порошкового материала по сравнению с моделью без подпрограммы (рис. 5).

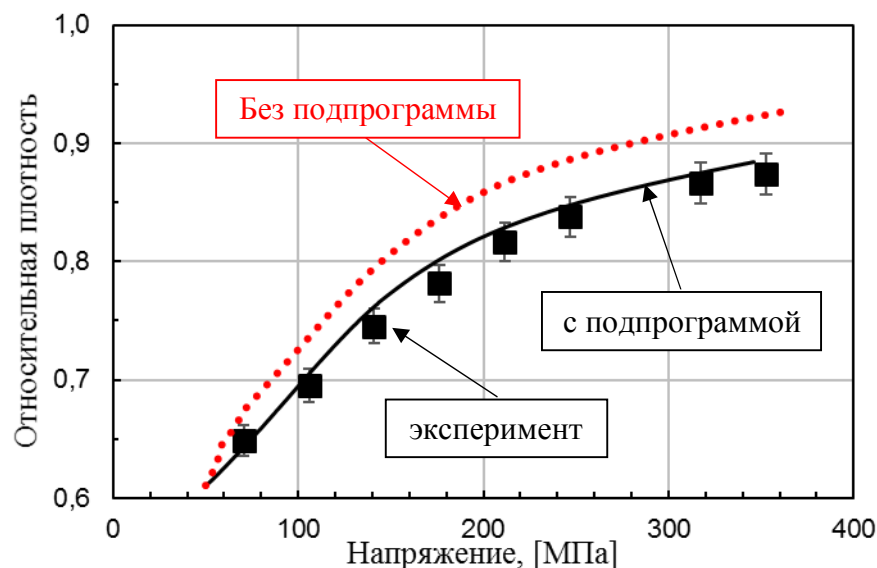


Рис. 5. Кривые уплотнения алюминиевого порошка АКВ-2.5, полученные при прессовании в замкнутой матрице.

Различие средней плотности между экспериментом и моделированием составляет 2% (для модели с использованием подпрограммы) и 7% (для модели без подпрограммы). Применение подпрограммы позволило повысить точность расчетов пористости и напряженно-деформированного состояния в порошковых материалах, что особенно важно для процессов уплотнения порошковых заготовок, при которых интервал изменения плотности лежит в широком диапазоне (экструзия, прессование, прокатка и др.).

Четвертая глава посвящена разработке расчетно-экспериментальной методики определения реологических характеристик порошкового и пористого материала по известным механическим характеристикам материала частиц и матричного материала на основании анализа деформации их идеализированной модели.

Известно, что процесс деформирования порошковых материалов условно может происходить по двум механизмам – межчастичного сдвига (структурной деформации) и пластической деформации материала самих частиц порошка. Подбором размера и формы частиц исходного порошка можно исключить этап структурной деформации.

На основе измерения плотности утряски сферических частиц порошка АКВ-2.5 построена регрессионная модель зависимости плотности утряски от количественного соотношения составляющих фракций (рис. 6) и определен фракционный состав порошкового композита, позволяющий исключить этап структурной деформации при уплотнении порошкового материала и осуществлять уплотнение пластическим деформированием материала частиц. Оптимизированный фракционный состав должен содержать 72.5% крупной фракции (размеры от 630 до 1000 мкм) и 27.5% мелкой фракции (размеры от 160 до 315 мкм).

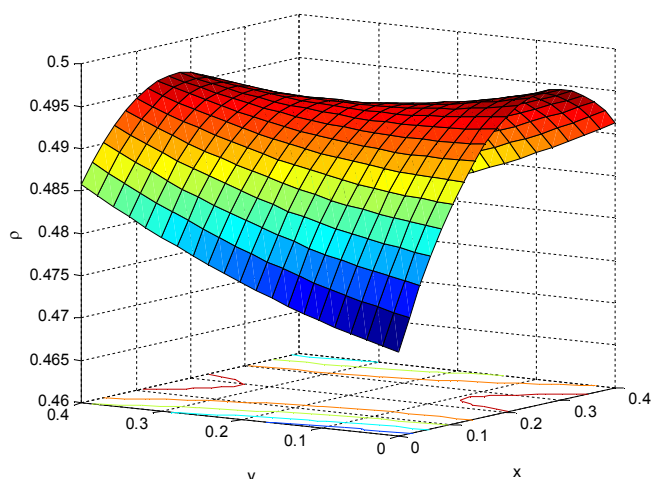


Рис. 6. Зависимость плотности утряски алюминиевых порошков АКВ-2.5 от массовой доли составляющих фракций.

Порошок с оптимизированным фракционным составом имеет плотность утряски $\theta_{\text{утр}}^{\text{opt}} = 0.50$. Согласно представлениям Павлова Н.Н. и Целесина Н.Н., уплотнение этого порошка начинается как процесс пластической деформации материала самих частиц порошка, этап структурного деформирования условно отсутствует. Для определения реологических характеристик такого порошкового материала можно использовать идеализированную модель порошкового тела, состоящего из сферических частиц одинакового размера. На рис. 7 показана модель порошкового тела, его представительная элементарная ячейка и конечно-элементная модель элементарной ячейки.

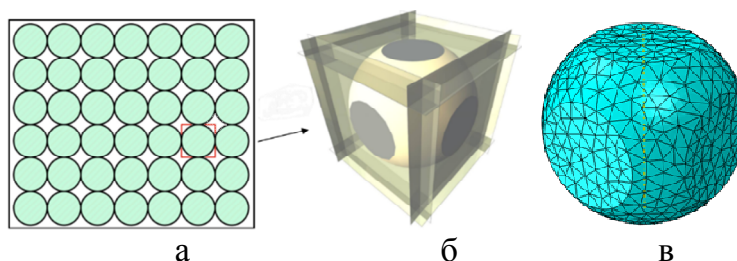


Рис. 7. Модель порошкового тела (а), его представительная элементарная ячейка (б) и конечно-элементная модель элементарной ячейки (в).

Для описания деформирования порошковых материалов используется эллиптическое условие текучести (рис. 8) с тремя характеристиками: p_s - предел текучести при гидростатическом сжатии; c - предел уплотнения и τ_s - предел текучести при пластическом сдвиге при $\sigma_0 = -c$.

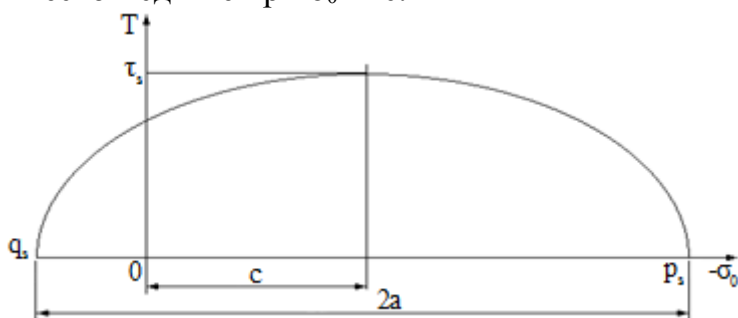


Рис.8. Кривая текучести в виде эллипса в плоскости гидростатического напряжения и интенсивности касательных напряжений

Условия гидростатического нагружения моделировали заданием граничных условий в перемещениях: элементарная ячейка равномерно сжимается абсолютно жесткими поверхностями до определенного перемещения с трех сторон с постоянной скоростью 3 мм/с. Контактное трение при деформации ячейки не учитывалось.

Для определения предела уплотнения c и предела текучести при пластическом сдвиге τ_s была разработана и использована схема нагружения, представленная на рис. 9.

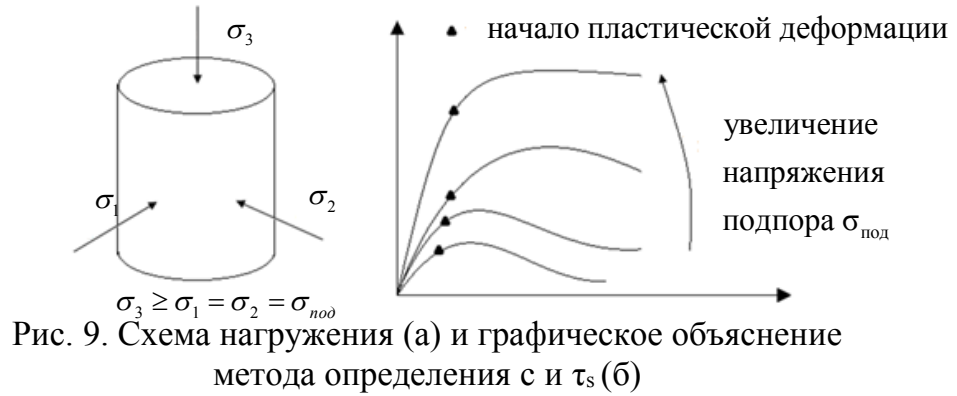


Рис. 9. Схема нагружения (а) и графическое объяснение метода определения c и τ_s (б)

Принцип работы этой схемы нагружения похож на схему гидростатического сжатия, в отличие от которой, напряжения вдоль осей 1 и 2 равны и меньше напряжения, давящегося с третьей стороны ($\sigma_1 = \sigma_2 < \sigma_3$). Напряжение подпора $\sigma_1 = \sigma_2$ варьируется от 0 (соответствующее схеме одноосного сжатия) до предела текучести при гидростатическом сжатии p_s . Результаты численных экспериментов представлены на рис. 10.

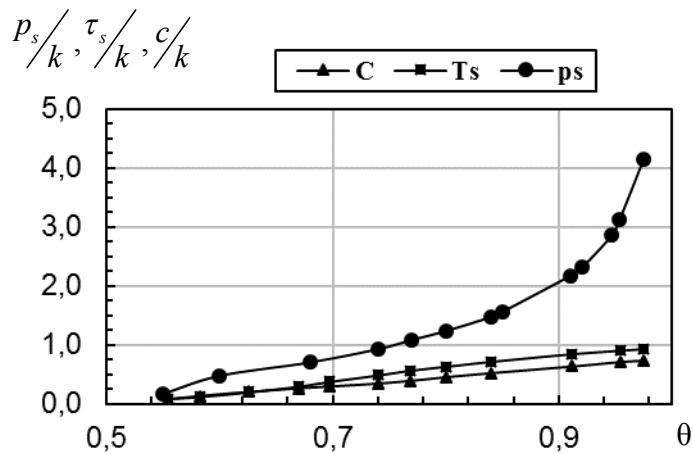


Рис. 10. Предел текучести при гидростатическом сжатии (p_s), пластическом сдвиге (τ_s) и предел уплотнения (c) при различной плотности.

На основе результатов численных экспериментов процессов деформирования представительной ячейки порошкового тела установлены аналитические зависимости предела текучести при гидростатическом сжатии p_s , предела текучести при пластическом сдвиге τ_s и предела уплотнения c от относительной плотности θ (при $\theta = 0.55 \div 0.975$):

$$\frac{p_s}{k} = 1.29 \ln\left(\frac{1}{1-\theta}\right) - 0.832, \quad \frac{\tau_s}{k} = \theta^{0.464} - 1.256(1-\theta), \quad \frac{c}{k} = \frac{0.56\theta^2}{(1-\theta)^{0.015}}.$$

На основе этих характеристик в соответствии с руководством по использованию программного пакета ABAQUS определены аналитические зависимости параметров модели Друкера-Прагера для порошкового материала от

относительной плотности θ и предела текучести материала частиц порошка при сдвиге k :

$$\beta = -0,242e^{5,137\theta} + 59,265,$$

$$R = 1,721\theta^2,$$

$$d = k * \operatorname{tg} \beta * (\theta^{0,464} - 1,256(1 - \theta)),$$

$$p_a = k * \frac{0,56\theta^2}{(1 - \theta)^{0,015}}.$$

При горячей обработке порошкового материала происходит частичное спекание. В этом случае его можно рассматривать как пористое тело, которое подчиняется эллиптическому условию текучести, причем эллипс симметричен относительно как гидростатической оси, так и девиаторной плоскости. На рис. 11 показана модель пористого тела и его представительная элементарная ячейка. В качестве матричного материала использован технический алюминий марки А1. Для анализ деформирования элементарной ячейки использован метод, разработанный Рыбиным Ю.И.

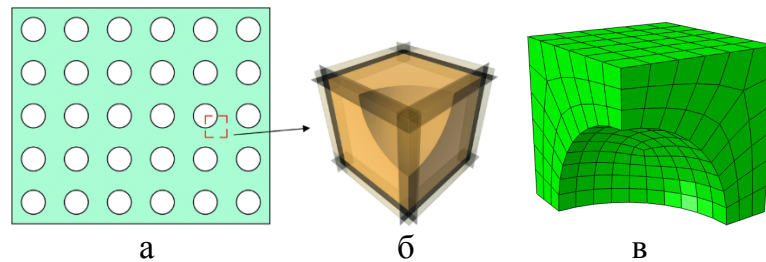


Рис. 11. Модель пористого тела (а), его представительная элементарная ячейка (б) и конечно-элементная модель элементарной ячейки (в).

Реологические характеристики пористых материалов определены при реализации условия чистого сдвига и трехосного сжатия в упругой и упругопластической зонах. Результаты численных экспериментов при различных плотностях представлены на рис. 12, 13. Для сравнения на рисунках приведены также данные по расчету Друянова Б.А. и Рыбина Ю.И.

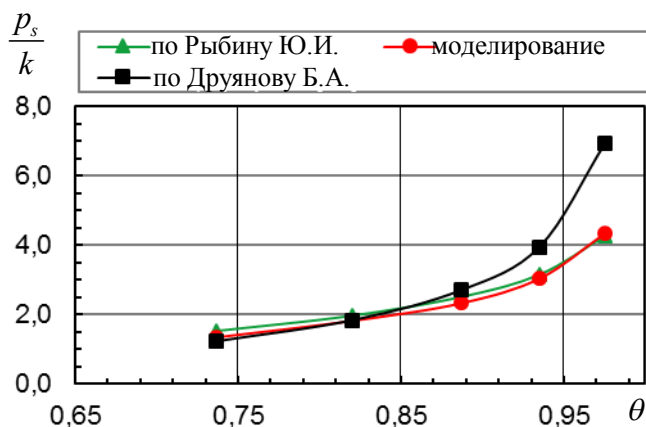


Рис. 12. Зависимость предела текучести при гидростатическом сжатии от относительной плотности

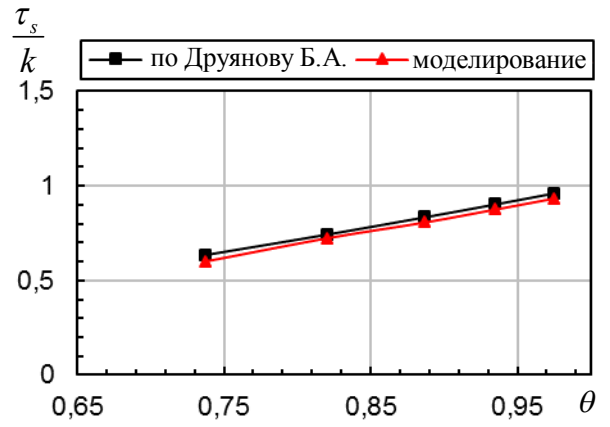


Рис. 13. Зависимость предела текучести при чистом сдвиге от относительной плотности

На основе этих характеристик в соответствии с руководством по использованию программного пакета ABAQUS определены аналитические зависимости параметров модели Друкера-Прагера для пористого материала от относительной плотности θ и предела текучести при сдвиге матричного материала.

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\theta^{3/2}}{-2 \ln \sqrt[3]{(1-\theta)}}, \quad d = k * \theta^{3/2}, \quad p_a = 0, \quad R = \frac{-2 \ln \sqrt[3]{(1-\theta)}}{\theta^{3/2}}.$$

Для моделирования деформирования порошковых материалов необходимо иметь информацию об упругих характеристиках. Модуль объемной деформации K определен из условий гидростатического сжатия, а модуль нормальной упругости E и коэффициент Пуассона ν – из условий одноосного сжатия. Зависимости параметров упругих характеристик порошкового и пористого материала от пористости Π , представлены в виде графиков на рис. 14.

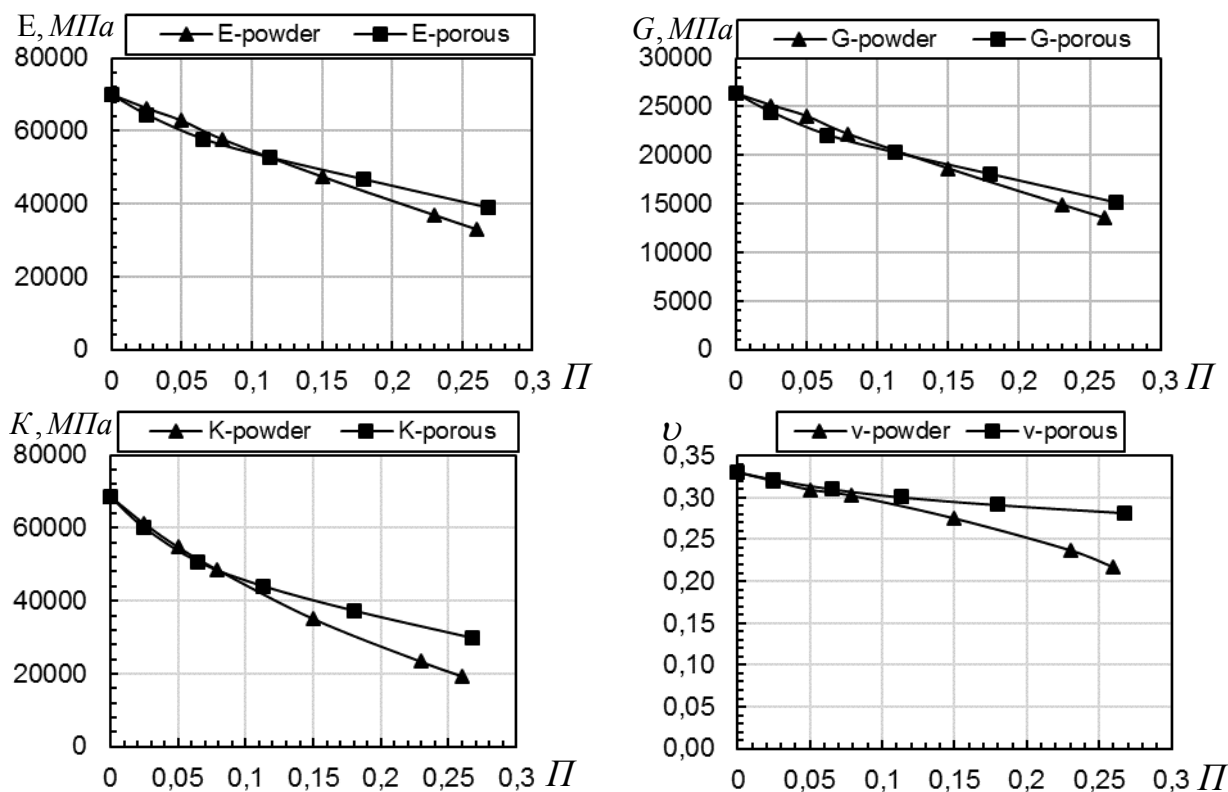


Рис. 14. Зависимость упругих характеристик пористого и порошкового тела от пористости.

Пятая глава посвящена применению разработанной методики определения реологических характеристик порошкового материала для моделирования процесса ГЭ порошкового материала, состоящего из 92% порошка алюминия АКВ-2.5 (ТУ 1791-99-043-2001) и 8% порошка упрочнителя – оксид алюминия Al_2O_3 (ТУ 6-09-426-75) в капсуле, изготовленной из АМг5. Температура процесса экструзии $427^\circ C$. Исходная заготовка (с порошковым материалом внутри) имеет радиус $R_n = 15$ мм и высоту $H_n = 60$ мм. Начальная относительная плотность порошкового материала $\theta_0 = 0,60$. Для моделирования процесса экструзии использован программный пакет Abaqus версии 16.4 и модель Друкера-Прагера с внедрением разработанной подпрограммы. На рис. 15 представлена схема процесса экструзии в капсуле с построением сетки конечных элементов. Реологические характеристики порошкового материала определены по разработанной методике и представлены на рис. 16.

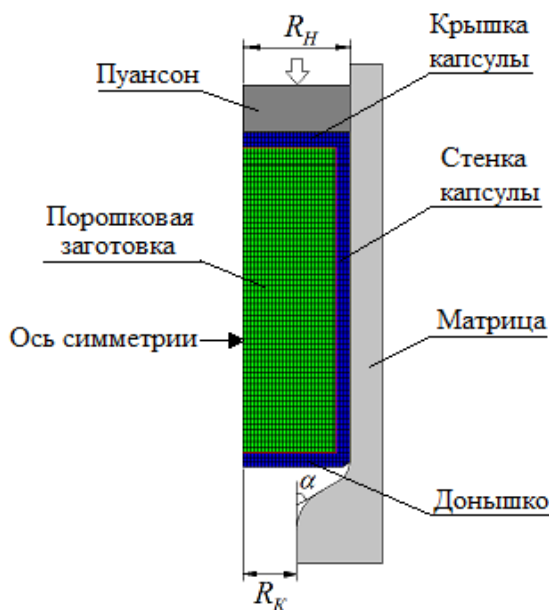


Рис. 15. Схема процесса горячей экструзии и сетка конечных элементов

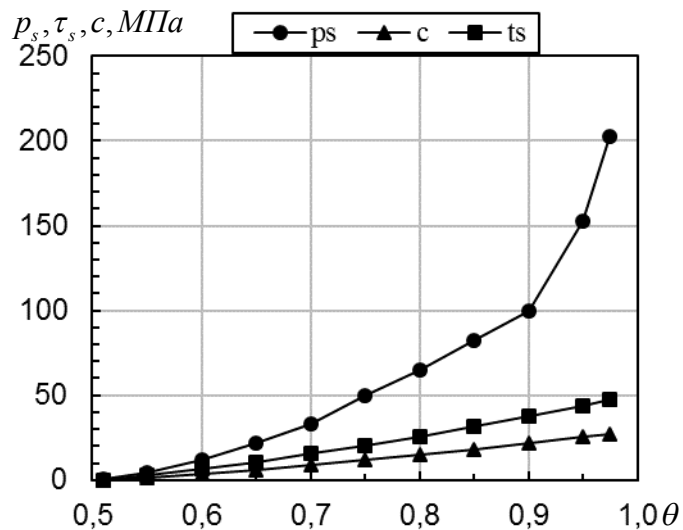


Рис. 16. Зависимость предела текучести при гидростатическом сжатии p_s , пластическом сдвиге τ_s и предела уплотнения c порошкового материала при различной плотности (при температуре 427°C)

При моделировании рассмотрены три стадии процесса экструзии: на начальной стадии усилие прессы целиком воспринимается металлической капсулой, плотность увеличивается только в области, прилегающей к пуансону и матрице, наблюдается зона небольшого разрыхления в осевой части порошковой заготовки у доньшка; на второй стадии наблюдается постепенное уплотнение порошкового материала по всему объему заготовки; третья стадия связана с истечением заготовки через выходное отверстие матрицы и формированием его конечного диаметра. Осевая часть заготовки уплотняется в последнюю очередь. Зона разрыхления у доньшка и осевая часть порошковой заготовки служат критерием выбора параметров экструзии.

Исследовано влияние конструктивных параметров капсулы. Установлено отсутствие влияния крышки капсулы на уплотнение заготовки. Более существенное влияние на процесс оказывает толщина доньшка. Установлено, что капсула с тонким доньшком (1-2мм) дает недостаточный подпор для полного компактирования порошкового материала. Использование капсулы со сравнительно толстым доньшком (>5мм) приводит к появлению существенной разнотолщинности оболочки полученного прутка после экструзии. Установлено, что в условиях плотного прилегания капсулы с порошковым материалом к боковой поверхности матрицы в исследованном интервале изменения толщины стенки капсулы (от 1 до 3 мм) плотность, качественная картина распределения деформаций, состояние полученных прутков практически идентичны. При выходе из матрицы прутка после совместного деформирования капсулы с порошковым материалом не наблюдается разнотолщинности оболочки.

Исследовано влияние величины зазора между капсулой и боковой поверхностью матрицы. Это влияние проявляется в потере устойчивости боковой стенки капсулы и может приводить к образованию гофра и его проникновению в порошковую заготовку, особенно при минимальной исходной плотности (рис. 17). Не допустить это негативное проявление можно за счет повышения исходной плотности порошковой заготовки, увеличения толщины стенки капсулы и

снижения допустимого зазора между капсулой и боковой поверхностью матрицы. Зависимости минимальной толщины стенки капсулы от величины зазора между капсулой и боковой поверхностью матрицы при различных начальных плотностях порошковой заготовки можно проиллюстрировать графиками, приведенными на рис. 18.

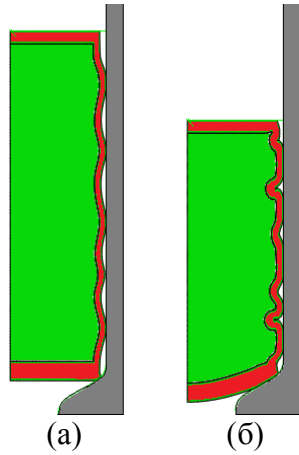


Рис. 17. Образование гофра (а) и его проникновение в порошковую заготовку (б) (толщина стенки $h = 1\text{мм}$; доньшко $t_d = 3\text{мм}$; $\theta_0 = 0.55$)

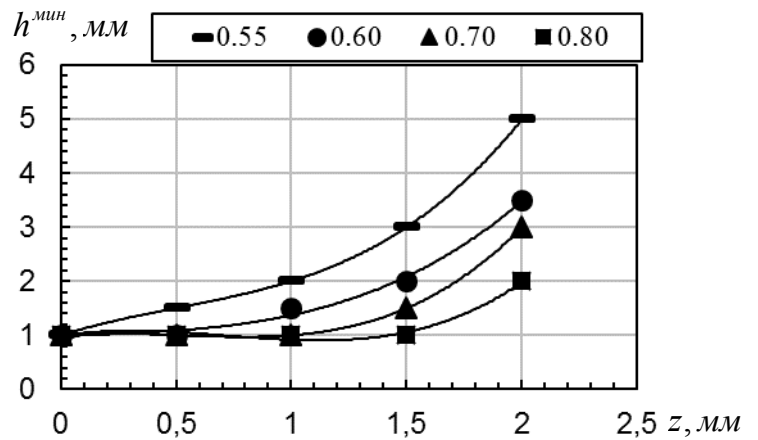


Рис. 18. Зависимости минимальной толщины стенки капсулы ($h_{\text{мин}}$) от величины зазора (z) при различных начальных плотностях порошковой заготовки

Исследовано влияние предела текучести материала капсулы на характер процесса совместного деформирования капсулы с порошковым материалом. Для обеспечения получения прутков с плотностью компактного материала при минимальном необходимом усилии прессы рекомендовано использовать в качестве капсулы материалы с пределами текучести в интервале значений от $0.75 \div 1.5\sigma_s$. Использование материала со значительно меньшим пределом текучести приводит к нарушению сплошности капсулы и разуплотнению порошкового материала. Использование материала с большим пределом текучести вызывает образование разнотолщинности капсулы и увеличение необходимого усилия прессы.

Зависимости протяженности зоны пониженной плотности на заходной части прутка и максимального необходимого усилия прессы от предела текучести материала капсулы можно иллюстрировать в виде графиков, представленных в рис. 19, 20.

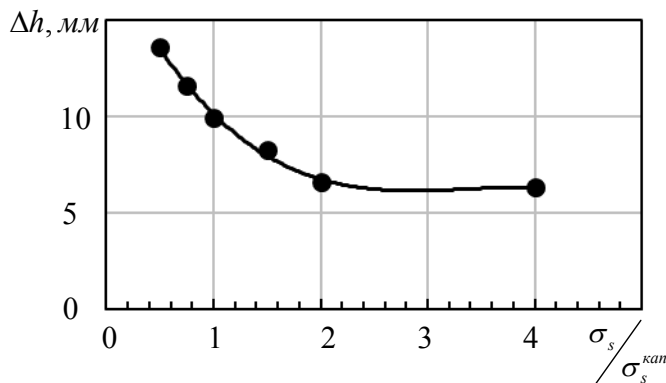


Рис. 19. Протяженность зоны пониженной плотности (Δh) при различных пределах текучести материала капсулы σ_s

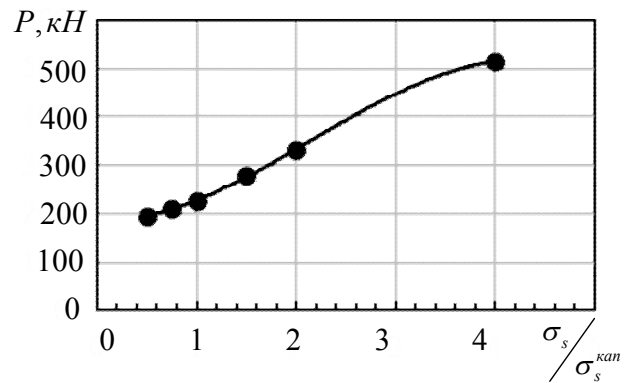


Рис. 20. Максимальное необходимое усилие прессы P при различных пределах текучести материала капсулы σ_s

Исследовано влияние коэффициента вытяжки и угла конусности матрицы на уплотнение порошковых заготовок. Установлено, что изменение коэффициента вытяжки оказывает гораздо большее влияние на процесс уплотнения заготовки, чем изменение угла конусности матрицы. Коэффициент вытяжки $\lambda=9$ приводит к достижению компактной плотности по всему объему заготовки, однако вызывает появление разнотолщинности оболочки экструдированного прутка, так как в этом случае существенно увеличивается неравномерность деформации разнородных компонентов (материала оболочки и порошковой заготовки). Влияние значения угла конусности матрицы на уплотняемость в этих условиях не обнаружено. Коэффициент вытяжки $\lambda=4$ обеспечивает получение из порошкового материала САП-1 прутки компактного состояния. При этом следует отметить, что в осевой части порошковой заготовки в вариантах экструзии с углами $2\alpha = 60^\circ$ и 90° наблюдается некоторая зона пониженной плотности (менее 0.975). Эта зона существует до момента формования конечных прутков, что может служить доказательством недостаточности обжатий при четырехкратной вытяжке для этих углов (рис. 21). Тем не менее, для этих вариантов экструзии (с углами конусности 2α равными 60° и 90°) разнотолщинность оболочки на ее стыке с боковой стенкой капсулы велика, что создает дополнительные потери при последующем отрезании заходной неплотной части прутка. Увеличение угла 2α до 150° не приводит к качественному улучшению условий уплотнения материала, но вызывает появление наплывов оболочки из-за высоких сил трения в застойных областях.

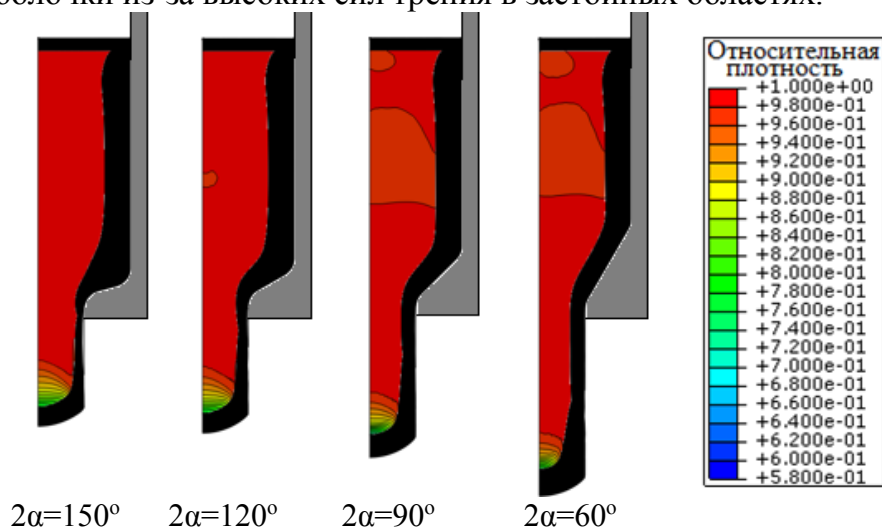


Рис. 21. Заключительная стадия экструзии заготовок:

Минимальное значение коэффициента вытяжки $\lambda=2$ не обеспечивает получение заготовки с беспористым состоянием ни при одном из рассматриваемых углов конусности матрицы 2α .

Таким образом на основе математического моделирования определены следующие технологические параметры для практической реализации процесса горячей экструзии порошкового композиционного материала САП-1 в капсуле: коэффициент вытяжки $\lambda \geq 4$. При $\lambda = 4$ целесообразно использовать матрицу с углом конусности $2\alpha = 120^\circ$. В этом варианте усилие пресса $P = 225$ кН. При $\lambda = 9$ матрицы с разными углами конусности дают практически идентичные результаты экструзии. В этом варианте усилие пресса $P = 355$ кН.

Шестая глава посвящена экспериментальному исследованию ГЭ композиционных заготовок на основе алюминия.

Для изготовления композиционных материалов на основе алюминия в качестве матрицы использован порошок из вторичного алюминия марки АКВ-2.5 (ТУ 1791-99-043-2001) размером частиц 0.16-1.0 мм. В качестве армирующих компонентов использован оксид алюминия Al_2O_3 (ТУ 6-09-426-75); редкоземельные элементы (РЗЭ), введенные в порошок ПА-4 (ГОСТ 6058-73) механическим легированием и углеродные нанотрубки (УНТ), синтезированные непосредственно на алюминиевых микрочастицах ПА-4 (ГОСТ 6058-73). В табл. 1 представлены составы порошковых материалов для получения композиционных материалов на основе алюминия методом горячей экструзии. Морфология порошков показана на рис. 22.

Таблица 1. Состав порошковых материалов для горячей экструзии

№ п/п	Состав, мас. %			
	АКВ-2.5	Al_2O_3	ПА-4+15%РЗЭ	ПА-4+2%УНТ
1	92	8	-	-
2	67	-	33	-
3	90	-	-	10
4	80	-	-	20

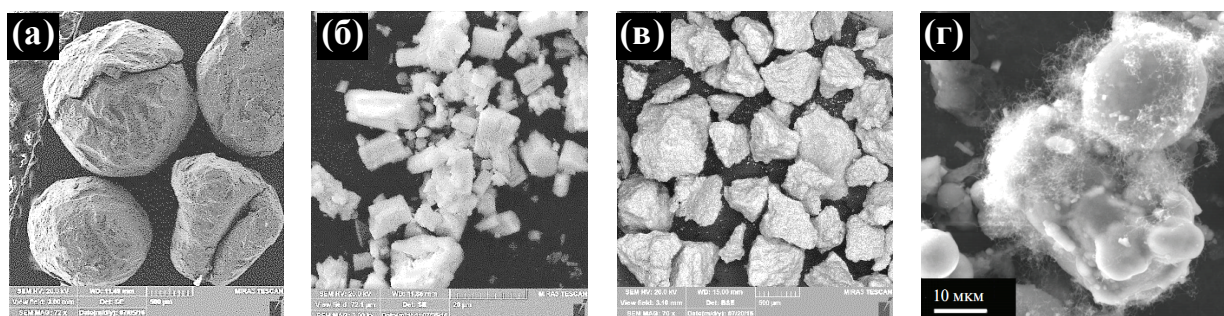


Рис. 22. Морфология матричного порошка АКВ-2.5 и порошка-упрочнителя а) АКВ-2.5; б) Al_2O_3 ; в) ПА-4+15%РЗЭ; г) ПА-4+2%УНТ

Капсулы для экструзии были изготовлены из прутка АМг5. Для горячей экструзии заранее подготовили порошковые брикеты методом холодного прессования в закрытой матрице. В качестве смазки использовали графит. После подготовки капсул, брикетов и оснастки был проведен натурный эксперимент горячей экструзии. Оснастка вместе с заготовкой нагревалась до температуры 400° - 430°С и выдерживалась 20 мин. После этого заготовка подвергалась деформированию заданием перемещения пуансона. Средняя скорость движения пуансона при экструзии равнялась 2–4 мм/с. В результате горячей экструзии получены прутки диаметром 10 мм и длиной 340-380 мм. Внешним осмотром полученных прутков не было выявлено обрывов оболочки.

Сравнение результатов математического моделирования и экспериментальных данных по силовым параметрам процесса горячей экструзии порошкового материала САП-1 показало их удовлетворительное согласование. Различие между расчетными и экспериментальными величинами усилия пресса P находится в интервале 1.5÷5.5%.

Исследование микроструктуры полученных прутков проводили на оптическом микроскопе *Carl Zeiss Observer D1m*. С использованием стандартной методики «пористость» системы анализа видеоизображения «*видеотест Структура 5.2*» были рассчитаны плотности всех образцов при различном увеличении. Установлено, что во всех вариантах экструзии плотность полученных прутков составляет 95÷98% от теоретической. При помощи электронного

сканирующего микроскопа Mira3 Tescan 5136LMU исследована микроструктура экструдированных прутков при различных увеличениях (рис. 23). На рис. 23 видно наличие упрочняемых фаз, распределенных сравнительно равномерно по сечению образцов, а также темных микропор и примесных включений.

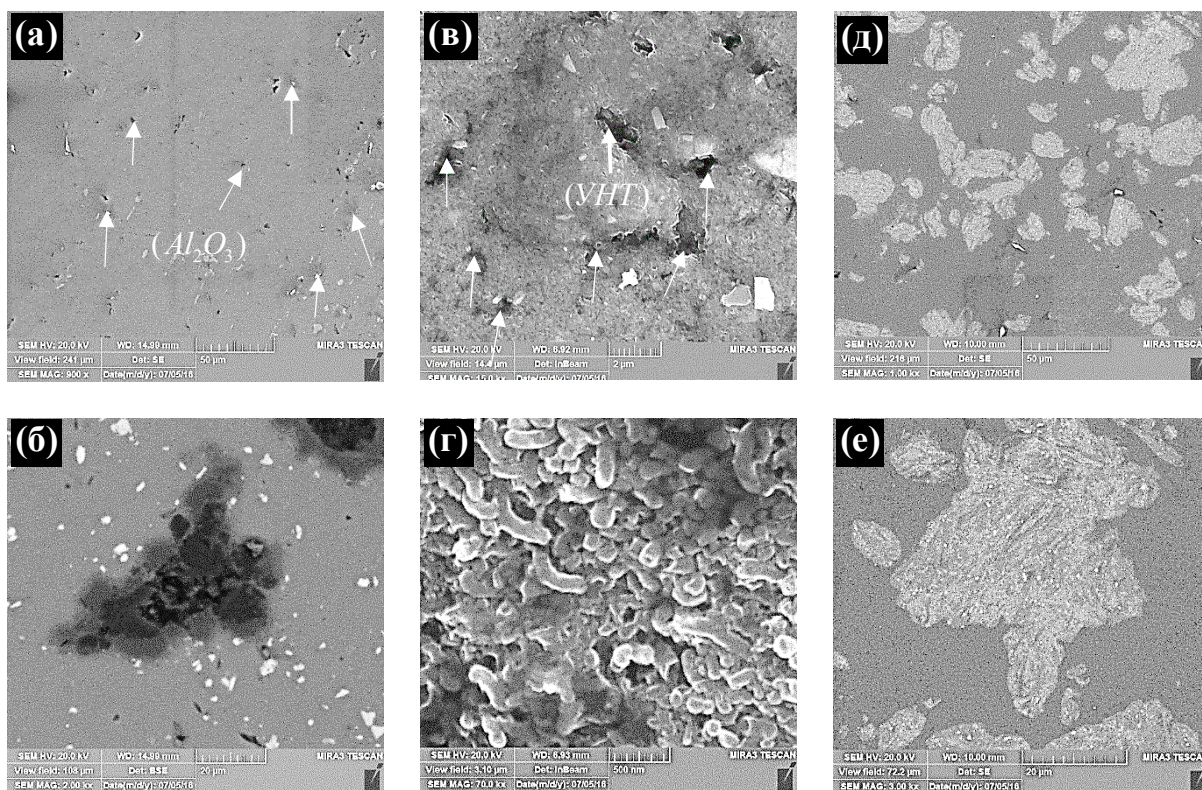


Рис. 23. Микроструктура экструдированных прутков при различных увеличениях:
 (а, б) – САГ-1; (в, г) – АКВ-2.5+20%(ПА-4+УНТ2%);
 (д, е) – АКВ-2.5+33%(ПА-4+15%РЗЭ)

Для оценки прочности прутков проведены испытания на растяжение на универсальной испытательной машине Zwick/Roell z100. Вид поверхности излома образцов представлен на рис. 24.

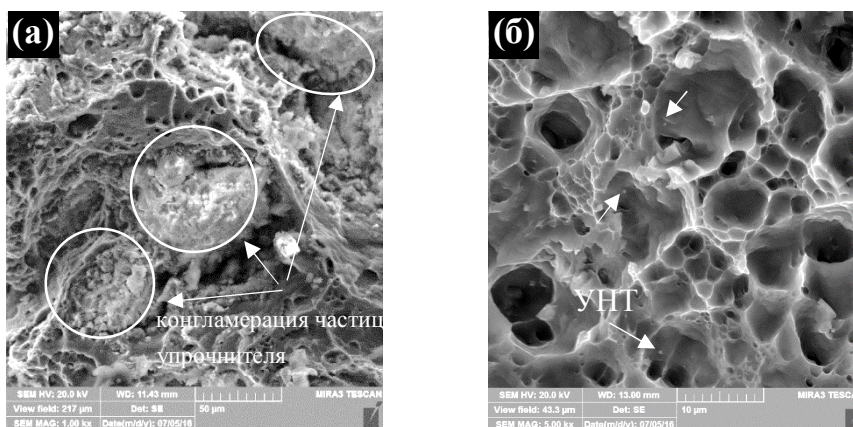


Рис. 24. Вид поверхности излома образца из САГ-1 (а) и АКВ-2.5+20%(ПА-4+2%УНТ) (б)

Результаты испытания на растяжение прутков показали, что прочность на растяжение составляет $168 \div 207$ МПа. Установлено, что прочность сцепления компонентов прутка после горечей экструзии находится на достаточно высоком

уровне и превышает прочность матричного материала (алюминий). Тем не менее, механические свойства таких прутков не достигают своих максимально возможных значений. Причиной сравнительно невысоких механических свойств полученных материалов является наличие конгломератов частиц упрочнителя в исходном состоянии, а также остаточных пор. Механические свойства полученных материалов могут быть улучшены посредством залечивания пор и разбиванием конгломерации частиц упрочнителя в процессе дальнейшей пластической деформации заготовок, в частности в процессе горячей прокатки. Результаты прокатки образцов на лабораторном Стане100 кафедры ТИМ в квадратных калибрах при температуре 400 - 450°C показали, что дополнительная пластическая деформация оказывает благоприятное влияние на формирование механических свойств порошковых материалов, полученных методом горячей экструзии. После прокатки в калибрах с вытяжкой $\lambda = 1,6$ удалось увеличить предел прочности прутка из АКВ-2.5+20%(ПА-4+УНТ2%) до 377 МПа, а предел текучести и предел прочности прутка из САП-1 достигли стандартных значений (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение механических свойств экструдированных прутков до и после прокатки.

№ п/п	Исходный порошковый материал	До прокатки		После прокатки		Стандартные значения	
		Предел текучести, $\sigma_{0.2}$, МПа	Предел прочности, σ_B , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0.2}$, МПа	Предел прочности, σ_B , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0.2}$, МПа	Предел прочности, σ_B , МПа
1	САП-1	83.3	168.5	151.1	226.7	120-160	230-280
2	АКВ-2.5+20% (ПА-4+2%УНТ)	125.7	207.8	129	377	-	-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны практические рекомендации по математическому моделированию процессов деформирования порошковых и пористых материалов на основе расчетно-экспериментальной методики определения их реологических характеристик. Результаты моделирования использованы для обоснования конструктивно-технологических параметров процесса горячей экструзии композиционных материалов на основе алюминия. По расчетным параметрам экспериментально получены образцы из композиционных материалов; изучено влияние дополнительной пластической деформации на формирование их структуры и механических свойств.
2. Выполнен анализ результатов моделирования процесса осадки порошкового материала в капсуле с использованием различных программных пакетов на основе МКЭ и встроенных в них реологических моделей материалов. Установлено, что программный пакет ABAQUS (со встроенной моделью Друкера-Прагера) в стандартной постановке задачи позволяет более точно отразить механику деформации и уплотнения порошкового тела при изменении плотности порошка со сферическими частицами в сравнении с программными пакетами DEFORM и LS-DYNA.
3. Для повышения точности расчетов в широком интервале изменения плотности порошкового материала разработана и запрограммирована на языке Fortran подпрограмма к программному пакету ABAQUS, позволяющая автоматически обновлять локальные параметры поверхности текучести уплотняемого материала. Подтверждена практическая эффективность использования разработанной подпрограммы и программного пакета ABAQUS с моделью Друкера-Прагера при

моделировании процесса прессования порошковых материалов в закрытой матрице.

4. На основе анализа деформирования элементарной ячейки идеализированной модели порошкового и пористого тела определены реологические характеристики порошкового и пористого материала. Установлены аналитические зависимости реологических характеристик порошкового и пористого материала от плотности. На основе результатов определения реологических характеристик порошкового и пористого материала определены аналитические зависимости параметров модели Друкера-Прагера от относительной плотности и предела текучести при сдвиге материала компактного состояния.

5. Результаты математического моделирования, выполненного с использованием программного пакета ABAQUS и реологической модели Друкера-Прагера с подключением разработанной подпрограммой, позволили определить характер уплотнения порошкового материала состава (АКВ-2.5+8%Al₂O₃) в процессе горячей экструзии, основные технологические параметры процесса, а также конструктивные параметры капсул, применяемых для получения беспористого композиционного материала САП-1.

6. Реализован процесс экструзии по установленным в ходе моделирования конструктивно-технологическим параметрам и получены композиционные заготовки на основе алюминия с различными упрочнителями (оксид алюминия, РЗЭ и УНТ). Установлено, что дополнительная пластическая деформация заготовок посредством горячей прокатки в калибрах с вытяжкой $\lambda = 1,6$ позволяет повысить предел прочности прутка из АКВ-2.5+20%(ПА-4+УНТ2%) до 377 МПа, а предел текучести и предел прочности прутка из САП-1 до стандартных значений. Разработаны практические рекомендации по осуществлению технологических процессов получения заготовок из дисперсно-упрочненных композиционных материалов.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Цеменко В.Н., Ганин С.А., Доан Ван Фук. Оптимизация фракционного состава алюминиевых порошков для последующего процесса горячей экструзии. Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ, 14). Труды международной научно-технической конференции – СПб. – 2014. – С.371-377.

2. Цеменко В.Н., Котов С.А., Ганин С.А., Доан Ван Фук. Особенности получения механически легированных порошков системы алюминий – редкоземельные металлы заданного размера и формы. Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ, 14). Труды международной научно-технической конференции. – СПб. – 2014. – С.377-379.

3. Цеменко В.Н., Котов С.А., Ганин С.А., Доан Ван Фук. Особенности получения механически легированных порошков системы алюминий – редкоземельные металлы заданного размера и формы. Новые перспективные материалы и технологии их получения НППМ-2014. Труды VI Международной конференции – Волгоград. – 2014. - С.240-242.

4. Tsemenko V. N., Ganin S. V., Doan Van Phuc. Technology development for al-rare-earth metals composite billets Production. Metal 2015 - Jun 3rd - 5th 2015, Brno, Czech Republic, EU. С.160-161.

5. Доан Ван Фук, Цеменко В.Н., Ганин С.А. Исследование и моделирование процесса осадки порошкового материала в оболочке. Современные металлические

материалы и технологии (СММТ, 15). Труды международной научно-технической конференции. – СПб. – 2015. – С.37-38.

6. Фук Д.В., Цеменко В.Н., Ганин С.А. Моделирование процесса осадки порошкового материала в оболочке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2015. – №3. – С.30-39.

7. Фук Д.В., Ганин С.А., Цеменко В.Н. Исследование процесса уплотнения порошковых материалов с использованием программного пакета Abaqus // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2016. – №1. – С.100-110.

8. Цеменко В.Н., Ганин С.А., Фук Д.В. Исследование и моделирование процессов деформации дисперсно-упрочненных порошков в оболочках // Механика и физика материалов. – 2016. - №25. – С. 68-76.

9. Tsemenko V. N., Ganin S. V., Doan Van Phuc. Research and simulation of the deformation process of dispersion-hardened powder in a capsule // Materials Physics and Mechanics. 25(2016), P. 68-76.

10. Доан Ван Фук, Цеменко В.Н., Ганин С.А. Моделирование и реализация процессов деформирования дисперсно-упрочненных порошков алюминия в незамкнутых объемах. Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ,16). Труды международной научно-технической конференции. – СПб. – 2016. – С.477-493.

11. Цеменко В.Н., Фук Д.В., Ганин С.А. Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых и пористых материалов. Часть 1. Порошковое тело // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2016. – №2. – С.124-133.

12. Цеменко В.Н., Фук Д.В., Ганин С.А. Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых и пористых материалов. Часть 2. Пористое тело // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2016. – №2. – С.134-143.

13. Цеменко В.Н., Фук Д.В., Ганин С.А. Анализ влияния параметров капсулы на процесс горячей экструзии порошковых заготовок с использованием математического моделирования // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – №9. – С.25-31.

14. Цеменко В.Н., Фук Д.В., Ганин С.А. Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых и пористых материалов. Часть 3. Процесс горячей экструзии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2016. – №4. – С.149-157.