

На правах рукописи



КРЮЧКОВ ДЕНИС ИГОРЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ПРЕССОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ КОМПОЗИТОВ
ИЗ ПОРОШКООБРАЗНОГО СЫРЬЯ**

05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2016

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Залазинский Александр Георгиевич

Официальные оппоненты: **Коликов Александр Павлович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», профессор кафедры «Обработка металлов давлением» Института экотехнологий и инжиниринга;

Котов Вячеслав Валерьевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доцент кафедры «Обработка металлов давлением» Института материаловедения и металлургии

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), г. Челябинск

Защита состоится 09 июня 2016 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Учёного совета)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=255509>

Автореферат разослан « » _____ 2016 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета



Людмила Алексеевна Мальцева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Разработка новых композитных материалов и совершенствование процессов изготовления изделий из порошкообразного титанового сырья является перспективным направлением развития машиностроительного производства. Одним из способов получения порошков является плазменное распыление в струе инертного газа, в том числе из расходуемых электродов, изготовленных из отходов машиностроительного производства. Особенности получаемого исходного сырья в частности из высокопрочного сплава ВТ-22, обуславливают существенные трудности его формования. В настоящее время для получения изделий применяется горячее изостатическое прессование (ГИП). Несмотря на все достоинства, технология ГИП требует применения специализированного дорогостоящего оборудования, характеризуется многостадийностью, значительными энергетическими затратами и малой производительностью. Это обуславливает необходимость исследований для установления возможности применения более простых методов формования, в частности холодного прессования заготовок с их последующим спеканием. Возникает проблема определения оптимального состава шихты и технологических параметров процессов для достижения требуемых характеристик полуфабрикатов и изделий. Применение подходов механики структурно-неоднородных тел совместно с методами компьютерного моделирования открывает новые возможности комплексного анализа уплотнения, формоизменения и консолидации частиц. В связи с этим разработка научных основ создания нового композитного материала из порошкообразного титанового сырья и совершенствования технологических процессов изготовления изделий из него является актуальным.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в экспериментальные исследования и совершенствование технологий обработки давлением порошковых материалов из титановых сплавов внесли В.Н. Анциферов, В.Л. Гиршов, О.М. Ивасишин, С.С. Кипарисов, Г.А. Меерсон, О.В. Роман, Дж.Е. Смугерески, В.Д. Талалаев, Ф.Х. Фроус, В.Т. Хайбергер и др.

Математическому моделированию процессов пластического деформирования материалов, изготавливаемых методом порошковой металлургии посвящены работы С.Е. Александрова, А.К. Григорьева, А.М. Дмитриева, Ю.Г. Дорофеева, Б.А. Друянова, А.Г. Залазинского, А.М. Золотова, Д.Д. Ивлева, В.Л. Колмогорова, Ю.Н. Логинова, А.Г. Овчинникова, В.Е. Перельмана, А.И. Рудского, Ю.И. Рыбина, В.М. Сегала, В.В. Скорохода, Н.А. Шестакова, М.Б. Штерна, В.Н. Цеменко и др.

Цель работы. С использованием методов компьютерного моделирования и натурального эксперимента определить оптимальный состав и рациональные условия прессования композитного материала, из порошкообразного сырья на основе высокопрочного сплава ВТ-22, и предложить технологические решения для его изготовления.

Задачи исследования:

1. Осуществить постановку и разработать методику решения краевой задачи механики обработки давлением композитных материалов, из порошкообразного сырья.

2. Разработать 3D-модель ячейки представительного элемента объема с кусочно-однородными свойствами для рассматриваемого класса порошковых композитных материалов.

3. Разработать архитектуру, алгоритмы, интерфейс оболочки и программные модули гибридного моделирующего комплекса для решения технологических задач обработки давлением структурно-неоднородных материалов, в том числе порошковых композитов. Выполнить тестирование гибридного моделирующего комплекса.

4. Идентифицировать параметры модифицированного условия текучести Друкера-Прагера композитного материала, на основе высокопрочного сплава ВТ-22 с различным процентным содержанием и осуществить компьютерное моделирование процесса прессования.

5. Выполнить экспериментальное исследование прессования композитных порошковых материалов, из порошкообразного сырья на основе высокопрочного сплава ВТ-22. Определить оптимальный состав и рациональные условия деформирования с точки зрения обеспечения требуемых механических характеристик и экономической обоснованности.

6. Установить особенности формоизменения и напряжённо-деформированное состояние структурных компонентов композитного материала на основе высокопрочного сплава ВТ-22 в процессе уплотнения.

7. Предложить технологические решения для способа получения порошкового материала на основе высокопрочного сплава ВТ-22 и изделий из него.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

1. Разработаны научные основы и методология создания нового композитного материала на основе высокопрочного сплава титана из порошкообразного сырья, предполагающие комплексное использование методов компьютерного моделирования и натуральных экспериментов, обеспечивающие сокращение материальных ресурсов.

2. Предложена 3D-модель ячейки представительного элемента объема композитного материала, представляющая пластически сжимаемую среду с кусоч-

но-однородными свойствами, позволяющая идентифицировать условие текучести для имитационного моделирования процессов обработки давлением.

3. Определены параметры модифицированного условия текучести Друкера-Прагера для идеализированной модели композитного материала на основе высокопрочного сплава ВТ-22 из порошкообразного сырья с различным процентным содержанием.

4. В рамках механики структурно-неоднородных тел разработана методика для определения напряжённо-деформированного состояния и исследования эволюции формоизменения структурных компонентов композитного материала в процессе уплотнения, и расширяющая возможности для анализа процесса консолидации частиц.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработаны алгоритмы и программные модули гибридного моделирующего комплекса для научных исследований, совершенствования технологических процессов обработки металлов давлением и в образовательных целях. Получено Государственное свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2014615774.

Получены экспериментальные данные о прессуемости многокомпонентных механических смесей порошков ВТ-22, ПТМ-1, ПМС-1, ПВ-Н70Ю30, ПНК-УТЗ, а также изучено влияние стеарата цинка в качестве пластификатора.

Предложены технологические решения способа получения композитного материала, из порошкообразного сырья на основе высокопрочного сплава ВТ-22 (Патент на изобретение РФ № 2555698).

Отдельные разделы диссертационного исследования выполнены в рамках планов НИР Института машиноведения УрО РАН, темы № 01201354600 «Построение математических и компьютерных моделей деформирования и разрушения материалов и конструкций и разработка методов совершенствования процессов изготовления изделий из материалов различной структуры с применением современных вычислительных методов и информационных технологий».

Результаты исследования использованы: в ИМЕТ УрО РАН при выполнении научно-исследовательской работы с ООО «Аквамарин» по получению материала из титанового порошка, изготовленного из сплава ВТ-22 методом распыления плазмой; в ООО «Уралинтех» при проектировании оснастки для изготовления биметаллических изделий круглого сечения, а также используются в курсе лекций по дисциплине «Теория обработки металлов давлением» на кафедре информационных технологий и автоматизации проектирования Механико-машиностроительного института.

Методология и методы исследования. Для постановки и решения краевых задач применялись подходы и методы механики структурно-неоднородных тел. Использовалась феноменологическая теория разрушения В.Л. Колмогорова, А.А. Богатова, С.В. Смирнова. Численное моделирование осуществлено методом

конечных элементов с использованием системы инженерного анализа Abaqus. Использовались элементы регрессионного анализа, методы статистического анализа данных. Для обработки экспериментальных данных использована сертифицированная система сбора исходной информации испытательной машины Tinius Olsen SUPER "L" 60.

Положения, выносимые на защиту

Методика решения технологических задач для определения напряжённо-деформированного состояния, поврежденности и исследования эволюции структурных компонентов металлических композитных материалов в процессе уплотнения.

Схема, алгоритмы и подпрограммы гибридного моделирующего комплекса для исследования напряжённо-деформированного состояния, прогнозирования поврежденности и оптимизации процессов обработки давлением структурно-неоднородных материалов.

Модель ячейки представительного элемента объема композитного материала, представляющая пластически сжимаемую среду с кусочно-однородными свойствами и регулярной структурой для идентификации параметров модифицированного условия текучести Друкера-Прагера и исследования напряжённо-деформированного состояния и эволюции структурных компонентов в процессе уплотнения.

Результаты экспериментального исследования прессования композитного материала на основе титаносодержащего порошкообразного сырья, изготовленного из сплава ВТ-22 методом распыления плазмой.

Результаты компьютерного моделирования прессования в закрытой пресс-форме композитного материала на основе высокопрочного сплава ВТ-22 из порошкообразного сырья с различным процентным содержанием механической смеси.

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

Личный вклад. В диссертации обобщены результаты исследования, полученные лично автором и в соавторстве. Проведение экспериментальных исследований осуществлялось совместно с сотрудниками ИМАШ УрО РАН и лаборатории порошковых, композиционных и нано-материалов ИМЕТ УрО РАН. Основная роль в получении и обработке теоретических данных, анализе, обобщении, подтверждении адекватности результатов, разработке архитектуры, алгоритмов и программных модулей гибридного моделирующего комплекса принадлежит автору работы. Постановка задачи исследования, обсуждение и интерпретация полученных результатов проводились совместно с научным руководителем д.т.н., профессором А.Г. Залазинским.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены на следующих конференциях: VII Российская научно-техническая конференция «Механика микронеоднородных материалов и разрушение», Екатеринбург, 2012 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.; Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «Инновации в материаловедении», Москва, 2013 г.; Международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», Екатеринбург, 2013 г.; VIII Российская научно-техническая конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», Екатеринбург, 2014 г.; Научно-практическая конференция «Актуальные проблемы математики, механики, информатики», Ижевск, 2014г.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 16 печатных трудах, в том числе 6 статей в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ. Получены 2 патента РФ на изобретения и 1 свидетельство гос. регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 114 наименований и приложения. Содержание диссертации изложено на 143 страницах, включая 52 рисунка и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

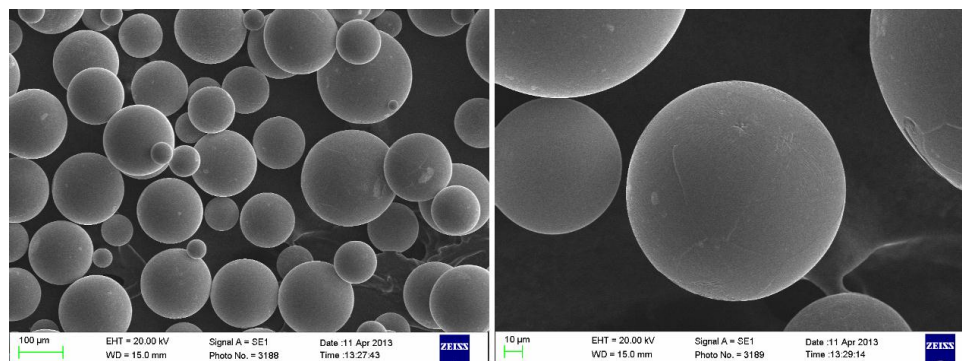
Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, указаны ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой литературный обзор, в котором отражено состояние теории и технологические аспекты обработки давлением порошковых материалов из титановых сплавов. Отмечены особенности технологии изготовления порошкообразного сырья из сплавов титана, преимущества и недостатки изготовления методами порошковой металлургии заготовок и изделий из него. Приведен обзор научных подходов для исследования процессов деформирования порошковых материалов. Показано, что разработка способов эффективного решения технологических задач обработки давлением композитных материалов все еще остается обла-

стью научного поиска. Упомянуто несколько направлений, связанных с возможностью расширения представлений о процессах, происходящих в структурных компонентах композитного материала и их состоянии при пластической деформации. Отмечены основные проблемы математического моделирования процессов пластического деформирования композитных материалов. Дана конечно-элементная формулировка теории течения для пластически сжимаемого тела и рассмотрены программные средства, используемые для моделирования процессов деформирования композитных материалов.

Вторая глава посвящена постановке и разработке методики решения краевой задачи механики деформирования композитов, формируемых из порошкообразного сырья.

В рамках механики структурно-неоднородных тел исследуется модель пластически сжимаемого гетерогенного материала с кусочно-однородными свойствами. Рассматриваемая среда, представляет собой конгломерат статистически однородных плотно упакованных частиц сферической формы. Использование сферической формы для компонентов модели композитного материала обосновано исследованиями характеристик исходных порошков (Рисунок 1). Основным компонентом композитного материала выбран порошок сплава ВТ-22, полученный плазменным распылением.



а)

б)

Рисунок 1 – Морфология порошка, полученного из сплава ВТ-22 распылением плазмой (а), топография поверхности частиц порошка (б)

Использование монофракционного состава в композитном материале позволяет добиваться равномерного распределения компонентов в процессе механического перемешивания шихты, что обосновывает применение регулярного расположения компонентов в модели (Рисунок 2). В соответствии с двухступенчатой иерархией моделей композитный материал рассматривается на макро- и микро-уровне. Применяется эргодическая гипотеза, в соответствии с которой для изучения статистических характеристик рассматриваемого материала достаточно одной представитель-

ной реализации деформируемой среды с использованием ячейки представительного элемента объема. Ячейка представительного элемента объема обладает кусочно-однородными свойствами, состоит из сферических частиц и занимает объем $\Omega = \omega_f \cup \omega_p$ (ω_f – объем частиц, ω_p – объем поры).

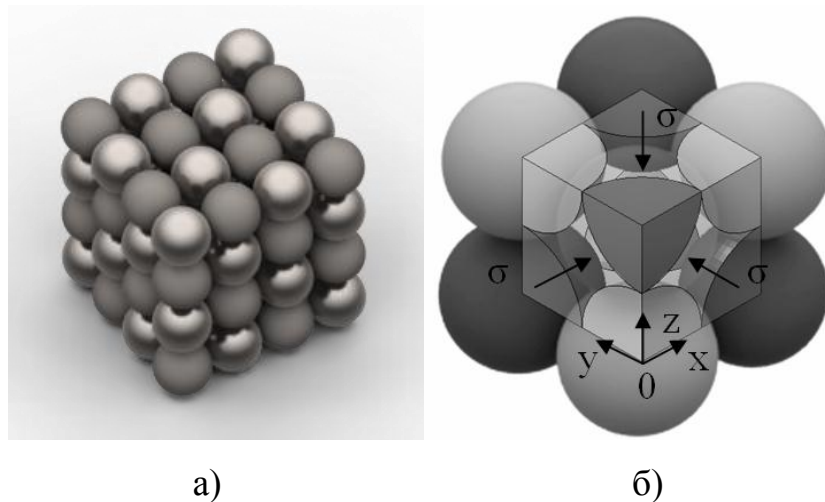


Рисунок 2 – 3D модель композитного материала (а) и модель ячейки представительного элемента объема композита (б)

Формулировка задачи заключается в следующем: необходимо определить напряженное состояние, степень деформации и поврежденность компонентов композитного материала, получаемого из порошкообразного сырья, в процессе формирования тела произвольной конфигурации. Решение рассматриваемой задачи осуществляется с использованием ряда последовательных этапов. Основные этапы решения задачи: имитационное моделирование деформирования ячейки представительного элемента объема; идентификация условия текучести и построение макроскопической модели среды; расчет макроскопического напряженно-деформированного состояния тела; определение напряжений и деформаций на микроуровне; расчет степени деформации сдвига и поврежденности компонентов композитного материала.

Для определения исходной информации и решения сформулированной выше задачи, проводятся соответствующие механические испытания материалов, представляющих собой компоненты композитного материала; принимаются структурная модель, геометрия тела и краевые условия.

На первом этапе осуществляется имитационное моделирование деформирования ячейки представительного объема. В каждый момент изменения относительной плотности, определяется напряженное состояние, соответствующее состоянию гидростатического сжатия, и напряженному состоянию прессования в закрытой пресс-форме. Описанный вычислительный эксперимент позволяет построить усло-

вие текучести, задаваемое лемниской Бернулли, а затем, используя близость кривых в интересующей для расчетов области (эллиптическом участке) геометрически осуществить идентификацию модифицированного условия текучести Друкера-Прагера и определить реологическую модель композитного материала на макро-уровне.

На макро-уровне с учетом реологической модели композитного материала задаются граничные и начальные условия для изучаемого деформируемого тела, и осуществляется решение краевой задачи. Устанавливается поле перемещений, определяются макроскопические напряжения и деформации в любом элементе макрообъема деформируемого тела. Устанавливаются траектории движения материальных точек в рассматриваемом макрообъеме.

Расчет напряжений микроуровня осуществляется с учетом напряженно-деформированного состояния макрообъема. Для этого вновь используется ячейка представительного элемента объема, в которой создается с помощью граничных условий, соответствующее напряженное состояние (Рисунок 3). Далее определяются компоненты тензора напряжений в элементах структуры композитного материала, и исследуется эволюция формоизменения частиц в процессе уплотнения.

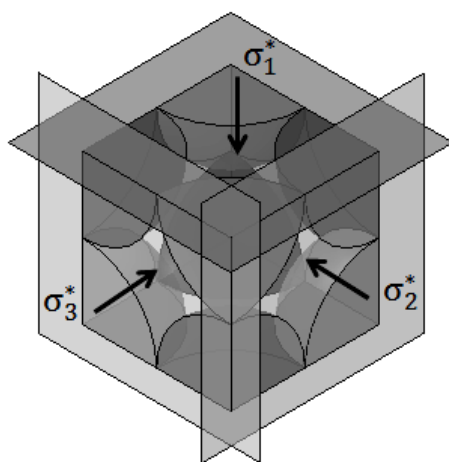


Рисунок 3 – Ячейка представительного объема, испытывающая действие макронапряжений $\sigma_1^*, \sigma_2^*, \sigma_3^*$

Для определения напряженного состояния и поврежденности элементов структуры рассматривается область контакта компонентов композита, и строится система уравнений в рамках теории пластического течения, используя физические уравнения Сен-Венана–Леви.

$$\sigma_{ij}^n = \sigma^n \cdot \delta_{ij} + \frac{2T^n}{H^n} \xi_{ij}^n \quad (1)$$

где n – порядковый номер структурного элемента, H – интенсивность скоростей деформации сдвига, T – интенсивность касательных напряжений, σ_{ij} – компоненты

тензора напряжений, ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформации, σ – среднее нормальное напряжение, δ_{ij} – символ Кронекера.

Используется условие пластичности:

$$\Gamma^n = \tau_s^n = \frac{\sigma_s^n}{\sqrt{3}}, \quad (2)$$

где τ_s – предел текучести на сдвиг, σ_s – предел текучести при линейном растяжении.

Используется модель, учитывающая деформационное упрочнение в холодном состоянии и удовлетворительно описывающая зависимость сопротивления деформации σ_s от накопленной степени деформации сдвига Λ в виде уравнения:

$$\sigma_s^n = \sigma_{s0}^n + g^n \Lambda^{(b^n)} \quad (3)$$

где σ_{s0} , g , b – константы, определяемые из простейших испытаний.

Интенсивность скоростей деформации сдвига H рассчитывается по следующей формуле:

$$H^n = \sqrt{\frac{2}{3} \left((\xi_{11}^n - \xi_{22}^n)^2 + (\xi_{22}^n - \xi_{33}^n)^2 + (\xi_{33}^n - \xi_{11}^n)^2 \right) + 4 \left((\xi_{12}^n)^2 + (\xi_{23}^n)^2 + (\xi_{31}^n)^2 \right)} \quad (4)$$

Степень деформации сдвига Λ в течение отрезка времени $0 \leq \tau \leq t$, рассчитывается по формуле:

$$\Lambda^n = \int_0^t H^n d\tau \quad (5)$$

Для расчета поврежденности необходимо располагать диаграммами пластичности компонентов композита, которые связывают величину предельной деформации сдвига Λ_p и коэффициент напряженного состояния k .

На этапе деформирования величина предельной деформации сдвига определяется с использованием уравнений:

$$\Lambda_p^n = \chi^n \exp(\lambda^n k^n) \quad (6)$$

где χ , λ – коэффициенты, определяемые используя опытные данные по методу наименьших квадратов.

Коэффициент напряженного состояния k (введенный В.Л. Колмогоровым) для каждой компоненты композитного материала по формуле:

$$k^n = \frac{\sigma^n}{\Gamma^n} \quad (7)$$

Деформирование представительного элемента объема осуществляется поэтапно. На каждом этапе деформирования величина поврежденности ω каждого компонента композита определяется согласно феноменологической теории, приведенной в работах В.Л. Колмогорова, А.А. Богатова, С.В. Смирнова, рассчитывается по формуле:

$$\omega^n = \frac{\Lambda^n}{\Lambda_p^n} \quad (8)$$

В результате решения краевой задачи в каждый момент деформирования для интересующего участка тела определяются напряжения, деформации и поврежденность в поверхностных слоях для каждого элемента структуры.

В **третьей главе** приводится описание гибридного моделирующего комплекса. Комплекс разработан для реализации методики решения краевой задачи механики деформирования композитов, формируемых из порошкообразного сырья, а также решения технологических задач обработки давлением структурно-неоднородных материалов. Гибридный моделирующий комплекс представляет собой проблемно-ориентированную оболочку, интегрирующей систему инженерного анализа Abaqus с системой компьютерной математики, построенную на базе математических библиотек языка Python.

Для каждого типа задач разработан программный модуль с интерфейсом конкретной задачи, в который вводятся данные, с возможностью варьирования основных технологических параметров исследуемых процессов.

Архитектура комплекса представлена в виде схемы на рисунке 4.

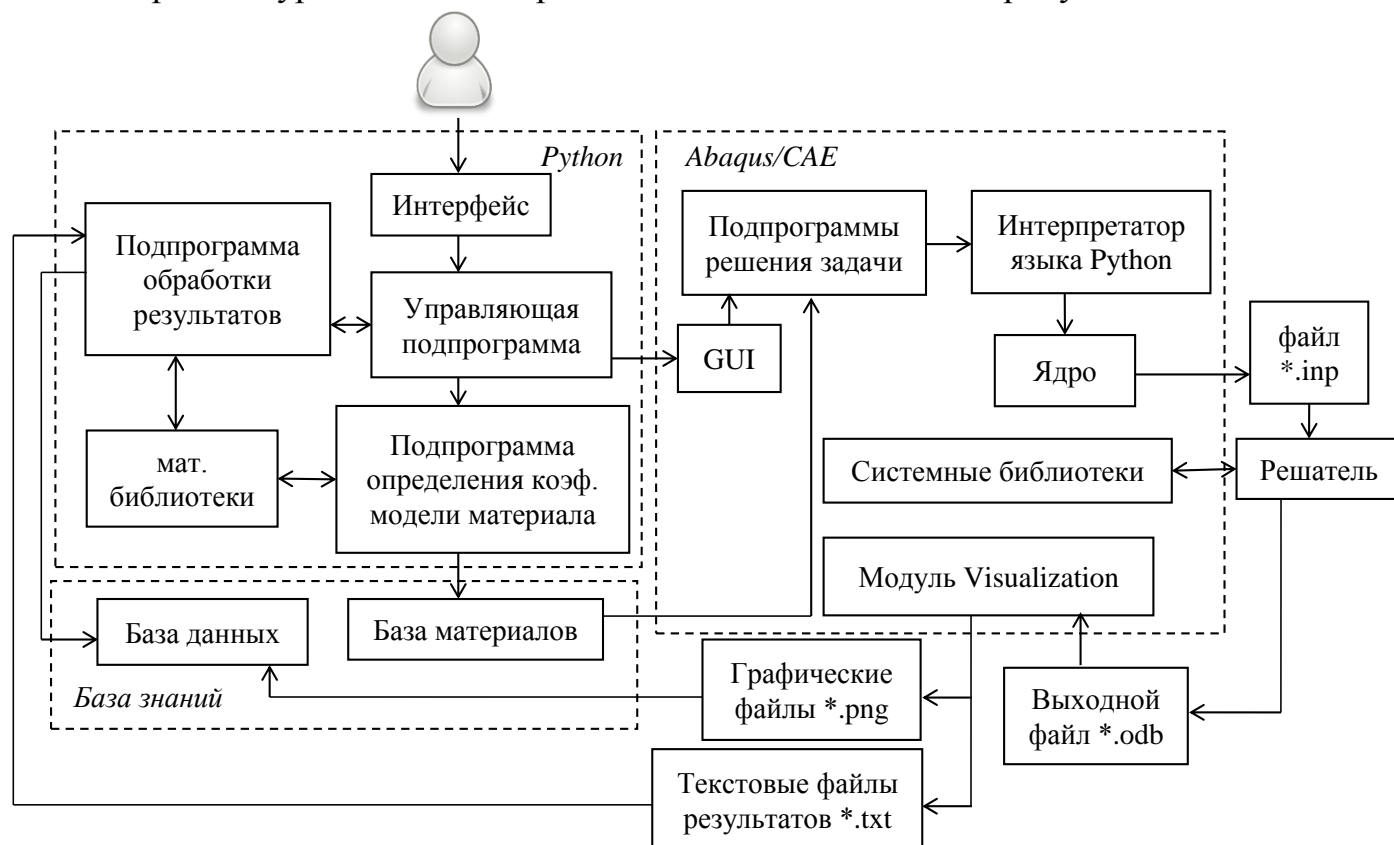


Рисунок 4 – Структурная схема гибридного моделирующего комплекса

Подпрограмма решения задачи вызывается и передается в интерпретатор языка, который в свою очередь вводит данные в ядро соответствующего модуля. Затем формируется входной файл с параметрами модели и данными граничных усло-

вий для расчета, в зависимости от типа задачи, в решателе Abaqus/Explicit или Abaqus/Standard. Решатель формирует выходной файл базы данных, который передается в модуль Visualization, где обрабатывается, формируя выходные данные в графическом и текстовом видах. Выходные данные накапливаются в базе данных и передаются в математическую подсистему, в которой по окончании набора данных вычислительного эксперимента, определяемых количеством варьируемых параметров, обрабатываются и с помощью регрессионного анализа решается задача оптимизации с поиском экстремума. Конечный результат передается пользователю, по завершению всех расчетных операций в виде графиков и рисунков.

Для отработки программных модулей и алгоритмов осуществлено моделирование процесса прессования титанового (BT1-0) прутка в медной (M1) оболочке через ступенчатую матрицу.

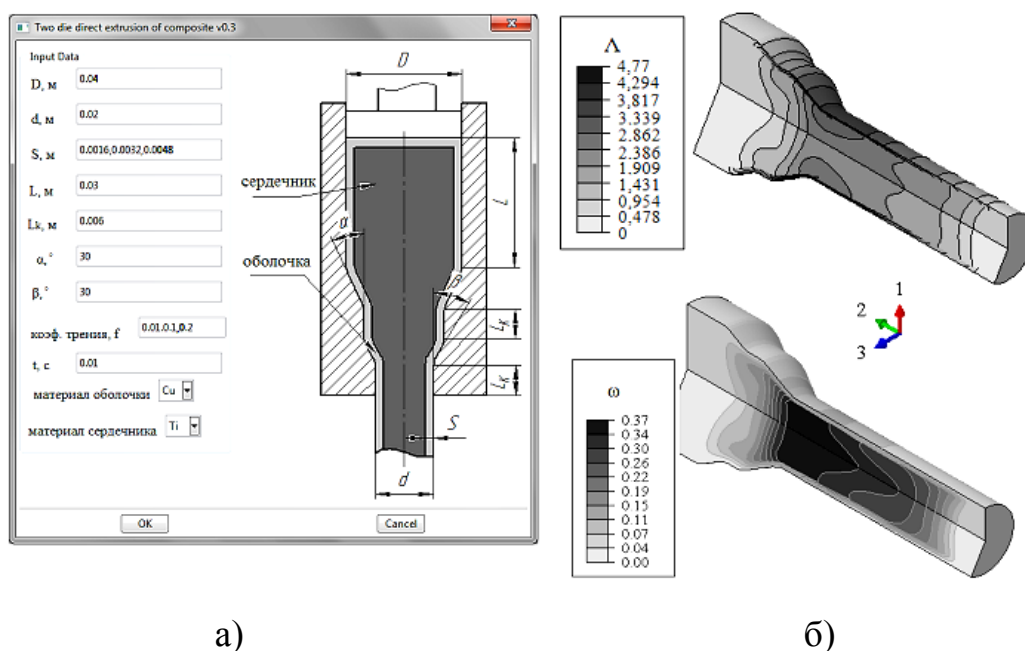


Рисунок 5 – Интерфейс программного модуля (а), результаты расчета распределения степени деформации сдвига Δ и поврежденности ω по сечению заготовки (б)

Варьировались отношение толщины оболочки S к диаметру D заготовки в интервале 0,04..0,2 и коэффициент трения ψ в интервале 0,01..0,2. Проведено пятнадцать численных экспериментов. В качестве результатов вычислений рассчитывались давление прессования p , отнесённого к величине предела текучести биметаллической заготовки σ_s^* усреднённого по поперечному сечению, усилие прессования P и максимальное значение поврежденности ω титана в очаге деформации. Для оценки адекватности результатов решения задачи, полученных с помощью гибридного моделирующего комплекса, осуществлен расчет верхней и

нижней оценки удельного давления, p^+/σ_s^* и p^-/σ_s^* соответственно. Сравнение расчетных данных удельного давления показало, что полученные значения лежат в интервале между верхней и нижней оценками.

На основании вычислительного эксперимента, с использованием накопленных выходных данных, в математической подсистеме построены графики зависимостей удельного давления прессования p/σ_s^* и значений накопленной поврежденности ω от варьируемых параметров (Рисунок 6).

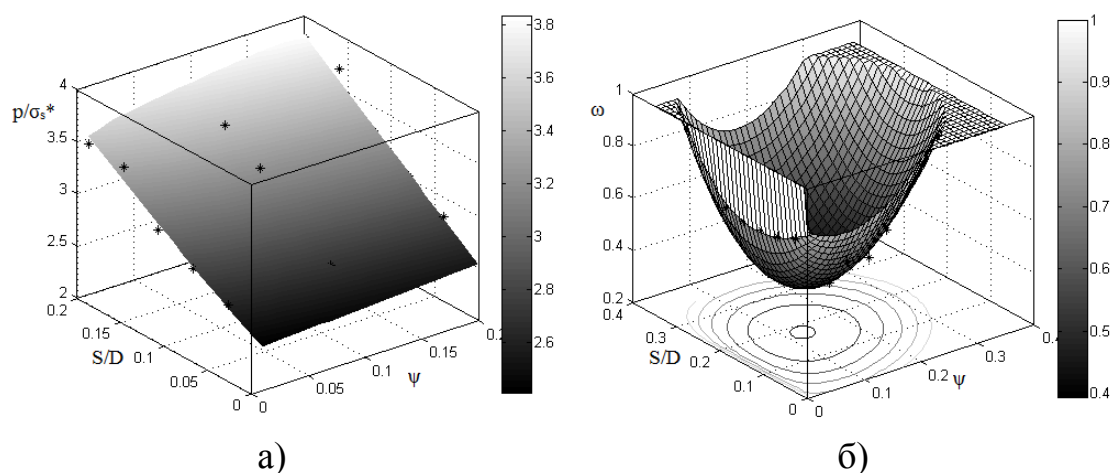


Рисунок 6 – Зависимость удельного давления прессования (а) и поврежденности (б) от коэффициента трения ψ и отношения толщины оболочки S заготовки к её диаметру D

Эффективность разработанного гибридного комплекса в сравнении с существующими подходами к моделированию и оптимизации технологических процессов, заключается в снижении трудоемкости процесса моделирования, например автоматизации процесса создания эскизов, задании краевых условий, расчета и накопления данных. Это позволяет значительно экономить время, а также сокращается влияние случайной ошибки при обработке данных. Наряду, с автоматизацией вычислений пользователь может вмешиваться в ход решения, например, на стадии математического анализа, изменить регрессионную модель, добавлять ограничения, расширять или сужать область значений для экстраполяции данных.

Результаты решения задачи доказывают, что программный комплекс может быть использован для научных исследований, совершенствования процессов обработки давлением, а так же в образовательных целях.

Четвертая глава посвящена имитационному моделированию процессов компактирования титановых композитов из порошкообразного сырья.

Согласно постановке задачи и разработанной методике, описанной в главе 2, на первом этапе определяется реологическая модель текучести материала, представляющего механическую смесь порошков ВТ-22 и ПТМ-1 с процентным содержани-

ем 50/50 и 75/25. Построение кривой текучести, задаваемой лемниской, осуществляется по характерным точкам, получаемым посредством имитационного моделирования деформирования ячейки представительного элемента объема (Рисунок 7).

Свойства материалов частиц композита задаются моделью упругопластической среды. Пластические свойства частиц задаются с использованием уравнения (3). Параметры модели материала определены по кривым течения из литературы. Значения параметров механических характеристик материалов частиц приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры механических характеристик компонент композита

Материал	ρ , кг/м ³	E, ГПа	ν	σ_{s0} , МПа	g, МПа	b
ВТ-22	4600	115	0,34	845	632	0,08
ПТМ-1	4500	112	0,34	390	342	0,658

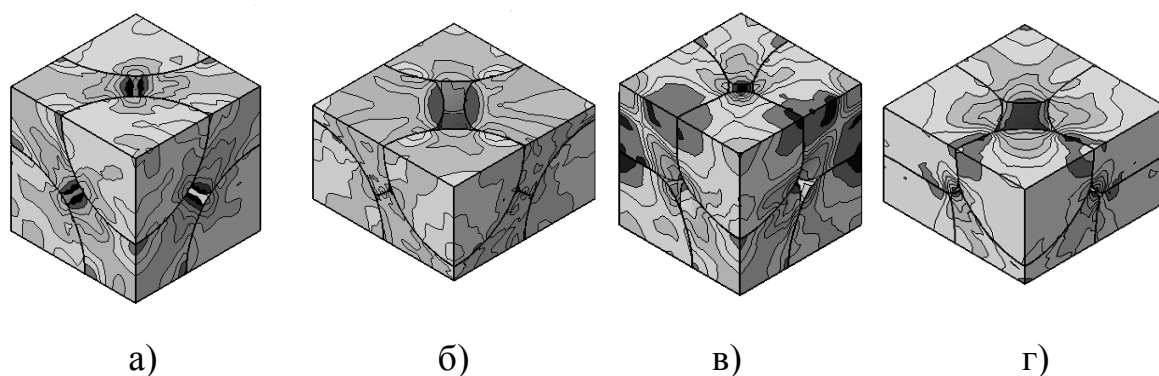


Рисунок 7 – Распределение среднего нормального напряжения при гидростатическом – а), в) и одноосном – б), г) сжатии для ячейки представительного элемента объема с процентным содержанием ВТ-22 50% – а), б) и 75% – в), г)

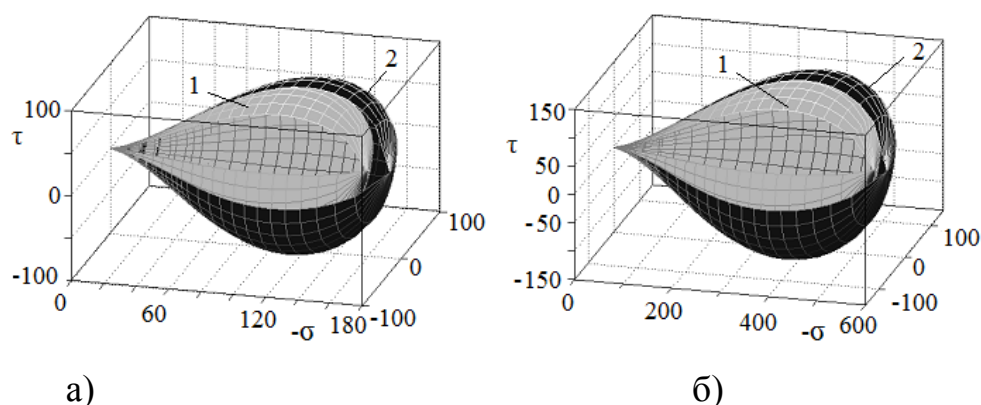


Рисунок 8 – Геометрическая интерпретация поверхностей текучести, заданные лемниской для относительной плотности 0,6 – а) и 0,9 – б) композитов ВТ-22+ПТМ-1 в соотношении 50/50 (1) и 75/25 (2)

Для описания свойств порошкового материала и последующего компьютерного моделирования процесса прессования определены коэффициенты модифицированной модели текучести Друкера-Прагера для материала композитов ВТ-22+ПТМ-1 с соотношениями 50/50 и 75/25.

С помощью полученных соотношений моделируется прессование брикетов в закрытой пресс-форме, определяется напряженно-деформированное состояние деформируемых заготовок, рассчитываются технологические усилия.

На рисунке 9 показано осевое сечение цилиндрического брикета из композита с двумя составами. Для состава 50% ВТ-22 + 50% ПТМ-1 среднее значение относительной плотности составляет 0,8, а для состава 75% ВТ-22 + 25% ПТМ-1 0,75.

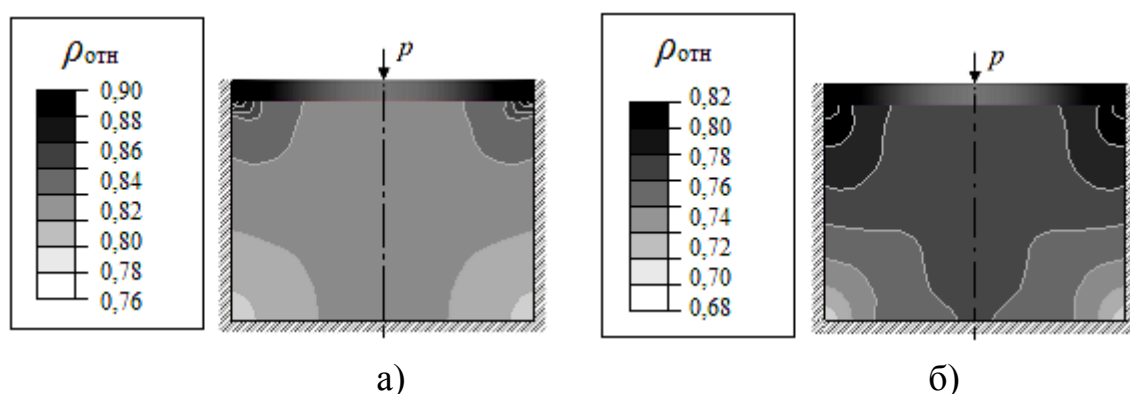


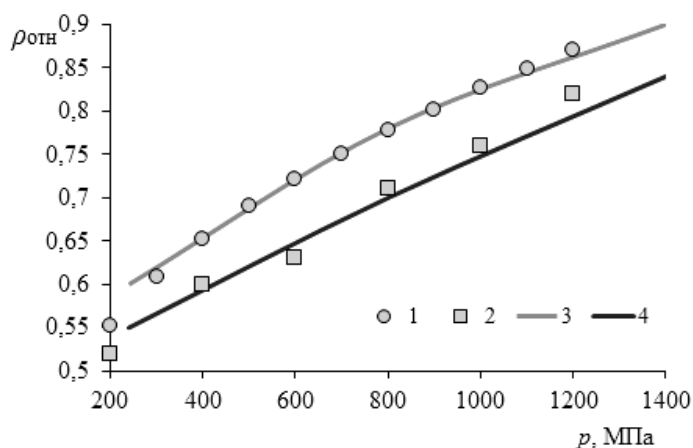
Рисунок 9 – Распределение относительной плотности в осевом сечении цилиндрического брикета из композита смеси ВТ-22+ПТМ-1 в соотношении 50/50 (а) и 75/25 (б) при достижении давления 1000 МПа

В горизонтальном направлении, в слое, прилегающем к деформирующему инструменту, плотность растет от центра к периферии, тогда как в слое находящемся на дне контейнера наоборот - плотность растет от периферии к центру. Неоднородное распределение плотности по объему брикета обусловлено затратой усилия прессования на преодоление внешнего трения прессуемой массы о контактирующие с ней поверхности элементов пресс-формы. Наблюдаемые результаты характерны для одностороннего формования. Результаты моделирования отражены на графике в виде зависимостей средней относительной плотности от давления прессования (Рисунок 10).

Как видно из графика (рисунок 10), результаты моделирования при использовании введенной выше модели текучести согласуются с экспериментальными данными. Отклонение значений, полученных при моделировании, со значениями, полученными экспериментально, не превышает 5%. Модель текучести может быть использована для решения задач прессования изделий и более сложной формы.

Достаточно простым методом оценки схватываемости (возможности консолидации) компонент композита служит расчёт степени пластической деформации

поверхностных слоёв материала контактирующих частиц, определение которых позволяет осуществить методика, описанная в главе 2.



1,2 – эксперимент, 3,4 – моделирование

Рисунок 10 – Зависимость относительной плотности брикетов $\rho_{отн}$ от давления p для состава ВТ-22 и ПТМ-1 в соотношении: 50/50 – 1, 3; 75/25 – 2, 4

Поскольку в деформируемых телах, представляющих брикеты из материала смеси ВТ-22+ПТМ-1 в соотношениях 50/50 и 75/25 определены напряжения, эти данные использованы в качестве граничных условий нагружения ячейки представительного объема композита согласно схеме, показанной на рисунке 3, для локальных областей, представляющих интерес. В данном случае, исследовалась центральная область брикета. В результате определено напряжено-деформированное состояние каждого компонента композитного материала.

На рисунке 11 показано распределение степени пластической деформации в частицах ячейки представительного объема материала смеси ВТ-22 + ПТМ-1 в соотношении 50/50 и 75/25, не показаны (сделаны прозрачно) значения ниже 0,13.

Имитационное моделирование показывает (Рисунок 11), что при деформации ячейки происходит равномерное растекание частиц ПТМ-1 вокруг частиц ВТ-22. Несмотря на отсутствие пластической деформации в частицах ВТ-22 степень пластической деформации частиц ПТМ-1 достаточно высокая, что может привести к разрушению окисных пленок и схватыванию частиц между собой. При сжатии ячейки смеси 75/25 частицы ПТМ-1 обтекают только соседствующие с ними частицы. В области контакта частиц ВТ-22 между собой деформация низкая, что не может способствовать образованию достаточного количества ювенильных поверхностей. Прилипание частиц в таких местах может отсутствовать.

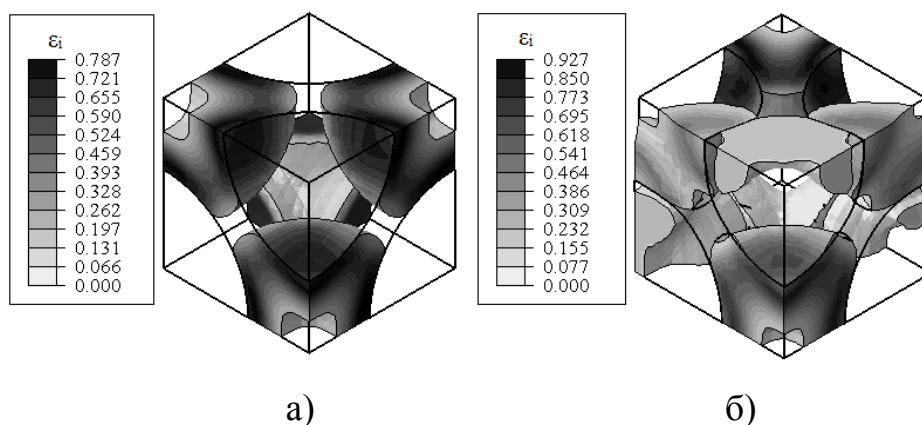


Рисунок 11 – Степень пластической деформации в частицах ячейки представительного элемента объема композита ВТ-22 + ПТМ-1 в соотношении 50/50 (а) и 75/25 (б)

Показано, что для обеспечения прессуемости механической смеси, основой которой составляет порошок ВТ-22, требуется внедрения более 25 % добавочных компонентов.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию прессования композитных заготовок на основе титана из порошкообразного сырья.

ВТ-22 является высокопрочным титановым сплавом Ti-5Al-5Mo-5V-Cr-Fe. Особенность морфологии порошка ВТ-22 требует внедрения в качестве добавок порошков с развитой поверхностью, которые должны способствовать схватыванию частиц. Добавочные компоненты должны отличаться не только формой поверхности, но также и более мягкими пластическими свойствами. Учитывая рекомендации из литературы по легирующим элементам для изготовления титановых сплавов, в работе исследовались смеси порошка сплава ВТ-22 с добавками: порошок титана, полученный гидридно-кальциевым способом ПТМ-1, порошок сплава никель-алюминий восстановленного ПВ-Н70Ю30, медь полученная электролизом солей ПМС-1, порошок никеля полученного карбонильным способом ПНК-УТЗ.

Процентное содержание добавок варьировалось с учётом рекомендаций специалистов лаборатории порошковых, композиционных и нано-материалов ИМЕТ УрО РАН, исходя из следующих соображений. С одной стороны, необходимо максимально возможно использовать порошок сплава ВТ-22, полученный в результате переработки отходов производства титана. Кроме того, стоимость ПТМ-1 в несколько раз выше, чем у ВТ-22, что является немаловажным фактором при производстве изделий из титановых порошков. Поэтому доля ПТМ-1 должна быть, по возможности, ограничена. Это же относится и к порошку сплава ПВ-Н70Ю30 исходя из того, что его плотность значительно выше (примерно в 1,75 раза), чем у ВТ-22 и ПТМ-1 и, следовательно, увеличение доли порошка ПВ-Н70Ю30 ведет к увеличению плотности всей композиции. С другой стороны, необходимо обеспечить сохранение

формы прессовок (исключить их осыпание, растрескивание, расслоение при последующем спекании).

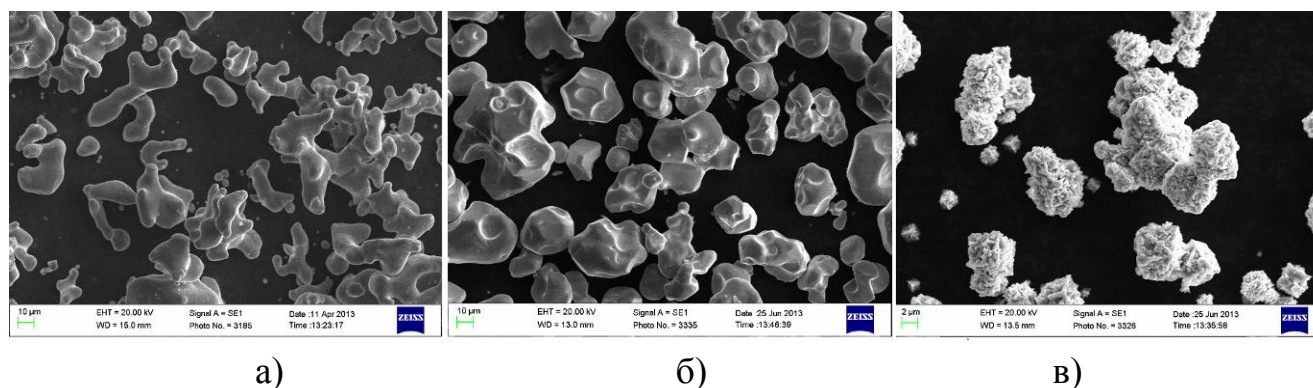


Рисунок 12 – Морфология частиц порошков:
ПТМ-1 (а), ПВ-Н70Ю30 (б), ПНК-УТ3 (в)

Прессование брикетов проводилось на гидравлическом прессе МС-500 и универсальной испытательной гидравлической машине Tinius Olsen SUPER “L” 60

С целью снижения давления прессования (при обеспечении заданной плотности заготовки) и напряжения выпрессовки на стенки пресс-формы наносился стеарат цинка (ст. Zn).

Прессование брикетов проводилось в закрытой разборной пресс-форме. Диаметр полученных образцов, из-за особенности конструкции пресс-формы, варьировался в пределах 10,9...11,36 мм. При этом фиксировалось усилие, действующее на пуансон, и перемещение пуансона. По усилию, действующему на пуансон, рассчитывалось давление.

После прессования получены брикеты средней относительной плотностью $\rho_{\text{отн}} = 0,71..0,85$. Качество брикетов удовлетворительное, при этом в ряде случаев для неспеченных образцов с содержанием ВТ-22 60% и выше наблюдалось осыпание нижней кромки. Спрессованные образцы спекались в вакууме 10^{-3} МПа в течение 2 часов при температуре 1200 °С, нагрев до температуры спекания 1 час. Использовалась вакуумная электропечь сопротивления камерного типа СНВЭ-9/18.

Помимо стоимости композиции, определяемой в основном процентным содержанием порошка ПТМ-1, учитывали прочность изделия после спекания. Прочность брикетов оценивали по результатам опытов на осевое сжатие. В момент начала разрушения заготовки фиксировалось усилие, и определялся предел прочности на сжатие при текущей плотности σ_p .

Исследование показало нецелесообразность введения стеарата цинка непосредственно в порошковую смесь в качестве пластификатора.

Для получения изделий с высокой прочностью и плотностью наиболее перспективным являются составы с содержанием ВТ-22(60-65%)+ПТМ-1(25-30%)+ПВ-

H70Ю30(5-10%) или ВТ-22(70%)+ПТМ-1(25%)+Cu(5%), причем для увеличения плотности заготовок рекомендуется поднять давление прессования выше 1000 МПа. С учетом фактора снижения стоимости исходного материала наиболее предпочтительным является состав с содержанием ВТ-22(60%)+ПТМ-1(10%)+ПНК-УТЗ(30%).

Для исследования механических характеристик изделий из композитного материала с содержанием ВТ-22(60%)+ПТМ-1(10%)+ПНК-УТЗ(30%), на предприятии ООО “Акварин” (г. Екатеринбург) изготовлены образцы (рисунок 13) в виде кольца. Образцы изготавливались методом холодного двухстороннего прессования с последующим спеканием. После спекания образцы имели среднюю плотность 4,6 г/см³, средняя относительная плотность составила 0,78. Размеры образцов: внешний диаметр – 28 мм, внутренний диаметр – 10 мм, высота – 9 мм.

Твердость материала, измеренная по Бринеллю на предприятии ООО “Акварин” составила 316 НВ, что соответствует твердости 33-34 HRC. По справочным данным твердость сплава ВТ-22 в отожжённом состоянии 285 НВ. Полученные значения твердости для образцов выше, чем у сплава ВТ-22.



Рисунок 13 – Образец

На основании проведенного испытания измерения микротвердости в системе Fisherscope НМ 2000 ХУm были получены значения твердости индентирования поверхности образца в нескольких точках. Результаты показывают, что на поверхности преимущественно присутствуют твердые составляющие. Наличие большего количества твердых структурных составляющих композита на поверхности образца указывают на ее высокую твердость, и может положительно сказываться на износостойкости изделия.

Для определения прочности полученных изделий из композитного порошкового материала на основе сплава ВТ-22 проведены испытания на осадку и радиальное сжатие.

В результате выполненных исследований процесса прессования брикетов из композитных материалов, представляющих механическую смесь порошка из сплава ВТ-22 и компонентов-пластификаторов, предложен способ получения порошкового материала на основе титана.

Установлен наиболее благоприятный режим стадии деформирования. Прессование проводится на гидравлическом прессе по следующей схеме: нагружение до 100 МПа, разгрузка, плавное нагружение до 1000 МПа, плавная разгрузка. Для повышения относительной плотности рекомендуется использовать двухстороннее прессование давлением 1200 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена 3D-модель ячейки представительного элемента объема, представляющая пластически сжимаемую среду с кусочно-однородными свойствами, для рассматриваемого класса композитных материалов из порошкообразного сырья с регулярной структурой.

2. Выполнена идентификация параметров модифицированного условия текучести Друкера-Прагера для имитационного моделирования процессов прессования порошковых композитных материалов, на основе высокопрочного сплава ВТ-22.

3. На основе структурно-феноменологического подхода осуществлена постановка краевой задачи и разработана методика для ее решения, позволяющая определять напряженно-деформированное состояние и прогнозировать поврежденность компонентов композитных материалов в процессах формования.

4. Разработаны архитектура, алгоритмы, интерфейс и программные модули гибридного моделирующего комплекса, представляющего объектно-ориентированную оболочку для системы инженерного анализа Abaqus. Комплекс предназначен для решения краевых задач механики и оптимизации технологических процессов обработки давлением структурно-неоднородных материалов, в том числе композитных.

5. С использованием гибридного моделирующего комплекса решена тестовая задача инженерного анализа и оптимизации по критерию обеспечения минимальной поврежденности материала биметаллического прутка при прессовании через коническую ступенчатую матрицу.

6. Осуществлено компьютерное моделирование процесса прессования порошкового материала, представляющего механическую смесь порошков ВТ-22 и титана марки ПТМ-1 с процентным содержанием 50/50 и 75/25. Результаты моделирования позволили расширить представления о состоянии структурных компонентов композитных материалов в процессе деформирования, в частности изучить изменение геометрии частиц при уплотнении.

7. Выполнено экспериментальное исследование прессования композитных порошковых материалов, из порошкообразного сырья на основе высокопрочного

сплава ВТ-22. Выбрано наилучшее соотношение компонентов шихты и условия формования с точки зрения обеспечения требуемых механических характеристик и экономической обоснованности.

8. Предложены технологические решения и разработан способ получения порошкового материала на основе высокопрочного сплава ВТ-22 и заготовок из него.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. **Крючков, Д.И.** Моделирование и выбор оптимальной формы матрицы на основе оценки поврежденности для прессования биметаллических проводников / Д.И. Крючков, А.Г. Залазинский // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 11. – С. 619-624 (0,41 п.л./0,21 п.л.).

2. **Крючков, Д.И.** Гибридный моделирующий комплекс для оптимизации процессов прессования неоднородных материалов / Д.И. Крючков, А.Г. Залазинский // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. – 2013. – №9. – С. 22 – 28 (0,53 п.л./0,26 п.л.).

3. **Крючков, Д.И.** Метод и программный комплекс для исследования процесса прессования композитов волокнистого строения / А.Г. Залазинский, Д.И. Крючков // *Программные продукты и системы*. – 2014. – №3. – С. 120-126 (0,56 п.л./0,28 п.л.).

4. **Крючков, Д.И.** Экспериментальное исследование процесса прессования титановых композитов из порошков / Д.И. Крючков [и др.] // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2014. – №6. – С. 34-38 (0,32 п.л./0,05 п.л.).

5. **Крючков, Д.И.** Влияние состава механической смеси порошков титана на свойства заготовок / Д.И. Крючков [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – №9. – С. 24-28 (0,35 п.л./0,07 п.л.).

6. **Крючков, Д.И.** Исследование свойств порошков сплава вт-22 и порошковых материалов на его основе / Т.Л. Щенникова [и др.] // *Перспективные материалы*. – 2015. – №4. – С. 15-21 (0,34 п.л./0,04 п.л.).

Патенты и свидетельства:

7. Пат. 2440864 Российская Федерация, МПК В 21 J 5/04 (2006.01), В 21 С 23/32 (2006.01). Способ полунепрерывного гидромеханического прессования заготовок / В.Л. Колмогоров [и др.]; заявители и патентообладатели Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук. – № 2010128353/02; заявл.08.07.2010; опубл.27.01.2012, Бюл. № 3 – 8 с.: ил.

8. Пат. 2555698 Российская Федерация, МПК В22F 3/15 (2006.01), С22С 1/04 (2006.01), С22С 14/00 (2006.01). Способ получения порошкового материала на основе титана / Г.Г. Залазинский [и др.]; заявители и патентообладатели Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук. – № 2014136976/02; заявл.11.09.2014; опубл.10.07.2015, Бюл. № 19 – 7 с.: ил.

9. Свид. 2014615774 Российская Федерация. Гибридный моделирующий комплекс для оптимизации процессов прессования неоднородных материалов / Д.И. Крючков, А.Г. Залазинский; заявители и патентообладатели Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук. – № 2014613361 заявл. 09.04.2014; опубл. 20.06.2014, Бюл. № 6. – 1 с.

Другие публикации:

10. **Kryuchkov, D.I.** Modelling of compaction of titanium composite powders / D.I. Kryuchkov, A.G. Zalazinskiy, I.M. Berezin, O.V. Romanova // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2015. – Iss. 1. – P. 48-60. – Режим доступа: http://dream-journal.org/issues/2015-1/2015-1_4.html (0,75 п.л./0,19 п.л.).

11. **Крючков, Д.И.** Компьютерное моделирование и оптимизация процесса прессования биметалла / Д.И. Крючков // *Механика микронеоднородных материалов и разрушение: материалы VII Российской научно-технической конференции*. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН. – 2012. – Режим доступа: 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) (0,07 п.л./0,07 п.л.).

12. **Крючков, Д.И.** Программный комплекс для моделирования процессов прессования структурно-неоднородных материалов / Д.И. Крючков // *Инженерные Системы – 2013: материалы международного форума*. – Москва, 2013. – С. 36-37 (0,04 п.л./0,04 п.л.).

13. **Крючков, Д.И.** Программный комплекс для моделирования структурно-неоднородных материалов / Д.И. Крючков // *Инновации в материаловедении: труды Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием*. – Москва, 2013. – С. 167 (0,05 п.л./0,05 п.л.).

14. **Крючков, Д.И.** Моделирование процессов обработки давлением высокопрочных порошков титана / 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 (0,28 п.л./0,07 п.л.).

15. **Крючков, Д.И.** Моделирование процессов компактирования порошковых титановых композитов / Д.И. Крючков, А.Г. Залазинский, И.М. Березин // *Ме-*

ханика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: труды научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2014. – С. 58 (0,07 п.л./0,02 п.л.).

16. **Крючков, Д.И.** Экспериментальное исследование прессования композита на основе порошка из сплава титана ВТ-22 / Д.И. Крючков [и др.] // Актуальные проблемы математики, механики, информатики: труды научно-практической конференции. – Ижевск, 2014. – С. 89-90 (0,08 п.л./0,02 п.л.).