

На правах рукописи

Богданова Нина Анатольевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ПРЕССОВОК ИЗ ВОСКООБРАЗНЫХ ПОРОШКОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Специальность: 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре - 2023

Работа выполнена в Институте машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМиМ ДВО РАН) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ФГБУН ХФИЦ ДВО РАН).

- Научный руководитель:** **Жилин Сергей Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН ФГБУН Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре.
- Официальные оппоненты:** **Келлер Илья Эрнстович**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела «Институт механики сплошных сред УрО РАН» - филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, г. Пермь.
Иванкова Евгения Павловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре.
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ им. Р.Е. Алексеева), г. Нижний Новгород.

Защита состоится “21” декабря 2023 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.316.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КНАГУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Комсомольского-на-Амуре государственного университета и на сайте организации по адресу www.knastu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим высылать в адрес диссертационного совета университета.

Автореферат разослан “ ___ ” _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



А.Л. Григорьева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы Функционирование машиностроительных предприятий определяет необходимость поиска технологий, направленных на повышение качества деталей ответственного назначения, снижение материальных затрат, связанных с исправлением дефектов. Отливки сложной конфигурации, с высокой точностью производят литьем по выплавляемым моделям (ЛВМ). Значительное число и продолжительность операций, номенклатура материалов определяют недопустимость затрат на исправление брака, образующегося в результате теплофизических явлений, сопровождающих нагрев и охлаждение материалов. Устранение усадки, волнистости и складчатости поверхности выплавляемых моделей достигается при их получении прессованием порошков воскообразных материалов. Однако при формировании изделий с участками разной толщины и протяженности в теле прессовки после снятия нагрузки могут возникать напряжения, искажающие ее геометрию. Регулирование параметров уплотнения и релаксации материала прессовки направлены на решение актуальной проблемы упругого отклика, что позволит расширить номенклатуру точных (в том числе биметаллических) отливок.

Изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) порошкового воскообразного тела при одноосном уплотнении, определено необходимостью получения новых знаний для выработки рекомендаций, связанных с:

- технологическими операциями формирования изделий без дефектов теплофизической природы (упругого отклика, поверхностных дефектов);
- режимами формирования протяженных и/или тонкостенных элементов прессовок сложной конфигурации.

Актуальность работы подтверждается проведением исследований в рамках плана НИР ФГБУН ИМиМ ДВО РАН на 2018-2020, 2019-2021 и 2022 пункта 24 «Механика технологий, обеспечивающих устойчивое инновационное развитие инфраструктур и пониженной уязвимости по отношению к возможным внешним и внутренним дестабилизирующим факторам природного

и техногенного характера» программы ФНИ государственных академий наук по направлениям исследований соответственно:

- «Разработка методов и приемов обработки материалов термомеханическим воздействием и создание на такой основе технологий производства конструкционных материалов и элементов конструкций» (рег. № 0299-2014-0002 и рег. № 121121600052-5);

- «Совершенствование и разработка методов формообразования элементов конструкций путем получения и обработки функциональных материалов с приложением консолидированного энергетического воздействия» (рег. № 122041900001-0).

Степень разработанности темы исследований. В заготовительном производстве получение точных отливок сложной конфигурации обеспечивается реализацией процессов ЛВМ. Сведения об особенностях конструирования отливок, процессах формирования ВМ и оболочковых форм (ОФ) были систематизированы отечественными и зарубежными авторами.

Последовательность операций ЛВМ сводится к формированию ВМ заливкой жидкой модельной массы в пресс-форму; изготовлению модельного блока, нанесению и сушке слоев огнеупорной керамической ОФ; выплавлению ВМ, прокалке ОФ и их заполнению расплавом металла. К негативным теплофизическим явлениям процесса относятся: изменения объема модельного материала при расплавлении или охлаждении, проявляющиеся в виде усадки и поверхностных дефектов. Получение бездефектного литья достигается соблюдением узкого диапазона температур, применением модельных материалов с низким термическим расширением. В результате предшествующих экспериментов, удалось обосновать положительное влияние пористости на геометрию и ряд эксплуатационных характеристик прессованных ВМ из одно- и многокомпонентных (в т.ч. с водорастворимыми добавками): прочность на разрыв и сжатие, теплоустойчивость, температурное расширение, разработать способы формирования прессовок и принципов проектирования пресс-оснастки. Вопросы формирования изделий со сложной про-

странственной конфигурацией остаются нерешенными в силу различий в напряжениях участков прессовок, отличающихся по протяженности и толщине, что приводит к появлению неравномерного упругого отклика, величина которого составляют 0,4-1,2 %. Его сокращение сводится к выбору скорости деформирования и времени выдержки прессовки в нагруженном состоянии. Численное моделирование уплотнения порошков направлено на прогнозирование значений плотности прессовок от давления. Результаты теоретических и экспериментальных исследований Бальшина М.Ю. и Ждановича Г.Н. в области деформационного механизма уплотнения порошков металлов требуют уточнения для аппроксимации экспериментальных данных.

С возможностью высокоточной регистрации напряжений при уплотнении порошковых сред, задачи определения взаимосвязи параметров уплотнения с величиной упругого отклика материала стали осуществимыми.

Цель диссертационной работы:

Исследование напряженно-деформированного состояния процесса уплотнения воскообразного материала и установление технологически обоснованных режимов формирования тонкостенных протяженных элементов прессовок, получаемых в условиях отсутствия внешних источников тепла.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследование влияния скорости деформирования и начальной упаковки порошковых материалов на напряженно-деформированное состояние прессовки, формируемой в закрытой пресс-матрице в условиях одноосного уплотнения;

- исследование влияния времени выдержки под нагрузкой, фракции воскообразного порошкового материала и пористости на формирование остаточных напряжений и геометрию прессовки, и установление технологически целесообразных режимов прессования;

- определение возможности применения метода конечных элементов для прогнозирования параметров напряженно-деформированного состояния

тонкостенной длинномерной прессовки, формируемой из воскообразного порошкового материала в ходе его одноосного уплотнения;

- изучение влияния условий холодного экструзионного выдавливания воскообразного материала, на напряженно-деформированное состояние и геометрию формируемой протяженной прессовки.

Методы исследований.

Экспериментальные исследования уплотнения воскообразного материала, связанные с регистрацией скорости и напряжений, возникающих при деформировании и разгрузке материалов, а также разрушении прессовок проводились на высокоточной испытательной машине AG-X plus Shimadzu.

В ходе моделирования процессов одноосного уплотнения воскообразных порошков и для целей имитации геометрии частицы порошка выполнялись в виде равновеликих сферических элементов. Нагрузки, возникающие при вариантах одноосного уплотнения рассчитывались методом конечных элементов и сравнивались с экспериментальными результатами.

Регрессионные зависимости убывания напряжений, возникающих при разгрузке уплотненного материала, по времени для прессовок из воскообразных порошков строились на основе параметров уравнения Кольрауша.

В ходе исследований использовались известные и новые методики, изготовленное оборудование, оснастка и материалы. Среди известных - методы определения физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств прессовок. Новые методы: аппроксимация экспериментальных данных по скорректированной формуле Ждановича Г.Н., используемой для построения кривой плотности прессовок от давления; способы получения биметаллической отливки, для модели которой реализован эксперимент.

Эксперимент обрабатывался методами математической статистики с помощью пакетов прикладных программ “Microsoft Excel”, “Mathcad”, “Wolfram Mathematica”, “QForm”. Физические величины, приведены к единицам Международной системы СИ или единицам, применяемым наравне с ними.

Диссертация оформлена по требованиям ГОСТ Р 7.0.11 -2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления».

Научная новизна работы.

- определен модуль Юнга для литого состояния воскообразного материала марки Т1, требующийся для корректного задания условий при компьютерном моделировании процесса уплотнения;

- определено влияние скорости деформирования и начальной упаковки порошковых материалов на напряженно-деформированное состояние прессовки, формируемой в закрытой пресс-матрице в условиях одноосного уплотнения;

- скорректирована формула аппроксимации экспериментальных данных Ждановича Г.Н. для построения кривой плотности прессовок из порошков воскообразных материалов от давления, возникающего при уплотнении;

- определено влияние времени выдержки под нагрузкой, фракции воскообразного порошкового материала и пористости на формирование остаточных напряжений и геометрию прессовки;

- определена возможность применения метода конечных элементов для прогнозирования параметров напряженно-деформированного состояния длинномерной прессовки, формируемой из воскообразного порошкового материала в ходе его одноосного уплотнения;

- определено влияние скорости деформирования и соотношения площадей поперечного сечения цилиндрической пресс-формы и диффузора на геометрию длинномерных элементов прессовок из воскообразного материала, моделирующих процессы формирования тонкостенных элементов выплавляемых моделей биметаллических отливок.

Изобретательская новизна по теме работы подтверждается 2 патентами РФ на изобретение №2696118 «Способ получения биметаллической отливки» и №2697995 «Способ получения биметаллической отливки».

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся результаты натурных испытаний, теоретические и экспериментальные результаты, позволившие предложить технологию формирования протяженных тонкостенных элементов прессовок из порошков на основе воскообразного материала:

- анализ методов сокращения дефектов выплавляемых моделей, формируемых из воскообразных материалов, обоснование их выбора и процесса формирования выплавляемых моделей прессованием;

- результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния фракции воскообразного материала и итоговой пористости прессовок на значения остаточных напряжений и величину упругого отклика;

- закономерности влияния начальной упаковки одно- и двухкомпонентных порошковых тел и скорости их прессования на напряженно-деформированное состояние прессовки в закрытой пресс-матрице;

- результаты экспериментальных исследований процесса холодной экструзии длинномерной прессовки из воскообразного материала;

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в установлении режимов формирования прессовок из порошков воскообразного материала, применяемого для получения пористых выплавляемых моделей повышенной размерной и геометрической точности и/или их элементов, не имеющих дефектов, образующихся в результате теплофизических процессов в материалах.

Степень достоверности и обоснованности результатов научных экспериментов обеспечиваются использованием комплекса известных методик, аттестованного измерительного оборудования, современных методов обработки данных, а также сопоставимостью с результатами исследований других авторов. Результаты исследований, выводы по ним и технологические рекомендации, представленные автором в диссертации, не противоречат современным научным представлениям. Заключение базируется на использовании классических постулатов физики, механики и материаловедения, известных и широко зарекомендовавших себя передовых достижениях производства.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на расширенных заседаниях ученого совета Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Комсомольск-на-Амуре, 2018-2023 гг.;

- в ходе III Дальневосточной школе-семинаре «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций», г. Комсомольск-на-Амуре, 2018 г.;

- в ходе Международного междисциплинарного симпозиума "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций", г. Томск, 2020 г.;

- на 13-ой и 14-ой Международных конференциях «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург, 2019-2020 гг.;

- в ходе работ V-ой и VI-ой Дальневосточных конференциях с международным участием «Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в металлургии и машиностроении», г. Комсомольск-на-Амуре, 2018 и 2022 г.

Личный вклад автора. Разработка общей концепции диссертационной работы, постановка и описание экспериментов, обоснование цели и задач, аналитическая работа, результаты, корректировка текста, составившие предмет диссертации, получены автором лично. С соавторами публикаций (С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.А. Соснин) осуществлен выбор темы, постановлен ряд задач, обсуждены и обобщены результаты исследований. Автор выражает глубокую признательность сотрудникам ИМиМ ДВО РАН, к.т.н., доценту О.Н. Комарову, к.т.н. Е.Е. Абашкину, к.ф.-м.н. А.В. Ткачевой, к.т.н. В.В. Предеину, к.т.н. А.А. Соснину, к.ф.-м.н. С.В. Фирсову, А.В. Попову, к.ф.-м.н. доценту кафедры «Авиастроение» ФГБОУ ВО «КНАГУ» Д.А. Потянихину за помощь, консультации и поддержку, оказанную при выполнении исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы. Отдельную искреннюю благодарность автор выражает члену-корреспонденту

Российской академии наук А.А. Буренину и д.т.н., профессору А.И. Евстигнееву за интерес и внимание, проявленное к данной диссертационной работе.

Публикации. Результаты исследований и содержание диссертационной работы опубликованы в 13 печатных работах, из них 4 рекомендованы ВАК РФ для публикации основных научных результатов диссертаций, 3 — в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus. Получены 2 патента РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов по работе, списка использованной литературы, приложений. Диссертация изложена на 148 страницах, содержит 42 рисунка, 8 таблиц, список использованной литературы из 154 наименований, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначена одна из задач машиностроения и направления ее решения, отмечены достоинства и недостатки метода получения точных металлоизделий в ЛВМ, определены перспективы его совершенствования путем внесения корректур в технологический процесс, направленных на устранение дефектообразующих факторов и расширение номенклатуры изделий. Отмечены проблемы в области формирования промежуточного продукта в процессе получения точных отливок, заключающегося в регулировании параметров уплотнения порошковых сред различных составов. Представлены актуальность исследования, обозначены цель и задачи, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе представлены основные способы повышения качества поверхности ВМ. Показаны преимущества и недостатки распространенных модельных материалов, рассмотрено влияние их составов на свойства ВМ, позволяющие обеспечить получение требуемых параметров литья. Превалирующее влияние на выбор воскообразных материалов оказывает вязкость расплава при температурах заполнения пресс-матрицы, коэффициент термического расширения, способность к сохранению геометрии.

Рассмотрены распространенные варианты формирования ВМ: свободная заливка жидкой модельной композиции в пресс-матрицу; заливкой рас-

плава модельной композиции под давлением; запрессовка пастообразного материала. Такие изделия характеризуются различной величиной и количеством усадочных дефектов, оказывают разрушающее воздействие на ОФ при выплавлении (вследствие расширения нагреваемого материала). Процессы получения ВМ в результате аддитивного формирования или механической обработки массива модельного материала низкопроизводительны.

Приводятся данные о предшествующих настоящей работе исследованиях, где отмечено положительное влияние пористости в структуре ВМ, получаемых прессованием воскообразных порошков. Повышение пористости и прочности прессовок достигается за счет включения в состав модельных материалов водорастворимых компонентов. Такой подход направлен на комплексное решение проблемы брака в ЛВМ ввиду отсутствия усадки и поверхностных дефектов у пористых ВМ, а также отсутствия их деформационного воздействия на ОФ. Недостаток: изменение геометрии в результате упругого отклика прессовки. Скудность сведений о процессах формирования прессовок сложной конфигурации затрудняет прогнозирование их структуры и определяет необходимость экспериментального исследования их НДС.

В представленном анализе источников определены варианты прогнозирования НДС порошкового тела в условиях прессования без внешних источников тепла. Начальный этап теоретические исследования процессов деформирования порошковых тел был посвящен получению эмпирических зависимостей плотности прессовки от усилия деформирования, что привело к основанным на теории дискретных сред, уравнениям теории прессования порошков. В 1948 году М.Ю. Бальшиным получено уравнение прессования для металлических порошков, при моделировании которых частицы представлены в виде сфер, взаимодействие между которыми описывается через контактное трение за счет взаимного их смещения относительно друг друга. На структуру и физико-механические свойства заготовки влияют насыпная плотность, гранулометрический состав и расположение частиц исходного материала. Номенклатура используемых материалов (в т.ч. не конструкцион-

ных) растет и для описания процессов их формоизменения, эмпирические уравнения прессования подходят лишь отчасти. Поскольку уравнения получают обработкой с помощью математического аппарата экспериментальных зависимостей, полученных для конкретных материалов и условий прессования, то численное моделирование рассматриваемых процессов без физического эксперимента невозможно.

Во второй главе описаны методики исследований, определяемые поставленными задачами и применяемыми материалами. Представлена последовательность проведения экспериментов, включающая определение свойств материала, исследование влияния его фракции, начального расположения элементов в порошковом теле и режимов формования на геометрические параметры прессовки получаемой в закрытой матрице и в ходе экструзионного выдавливания, имитирующего изготовление тонкостенных элементов ВМ.

Представлена целесообразность использования в экспериментах порошкового материала марки Т1, являющегося компонентом парафиностеаринового состава ПС50/50. Среди компонентов воскообразных материалов парафин марки Т1 (величина объемной усадки которого достигает 17% и плотность в литом состоянии $\rho_{\text{лит}} = 0,86 \text{ г/см}^3$), наиболее подвержен изменению объема при внешних теплофизических воздействиях. Однако тепловая усадка Т1 отсутствует в экспериментальных ВМ, что заложено принципом их получения прессованием порошков. Среди методов исследования физико-механических свойств воскообразного материала следует отметить определение модуля упругости Юнга (Е) для Т1 (т.к. этот материал не является конструкционным и такие табличные данные отсутствуют). Значение $E = 81,91 \text{ МПа}$, требующееся для корректной задачи свойств деформируемых элементов в расчетах, осуществляемых при помощи программного комплекса, получено на тестовой машине AG-X plus Shimadzu в ходе испытания серии образцов на сжатие по ГОСТ 25.503-97. «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие».

Равномерное заполнение порошком Т1 фракций 0,63 и 2,5 мм цилиндрической стальной пресс-матрицы и устранение воздушных «арок» перед уплотнением обеспечивается вибрацией с частотой 3,5 Гц. В результате экспериментов появляются зависимости напряжений при сжатии порошкового тела и напряжений разгрузки при релаксации материала от времени его выдержки под нагрузкой, а также величины упругого отклика прессовки $O_{п}, \%$.

Для аппроксимации экспериментальных данных релаксации напряжений, возникающих в ходе процесса деформирования, использовалась двухпараметрическая зависимость Кольрауша в виде:

$$\sigma_i = \sigma_0(P_i) \cdot \exp\left[-(t/\tau)^k\right]$$

где $\sigma_0(P_i)$ – максимальное значение напряжения на пресс-пуансоне в момент начала разгрузки при заданной пористости P_i .

Параметры τ и k регрессионной зависимости определяли с помощью метода наименьших квадратов, применяя его к экспоненциальной функции.

При моделировании НДС прессовки использованы сферические компоненты, располагаемые в один слой в пресс-матрице по схемам формирования элемента модели биметаллической отливки (рис.1 и 2). При их уплотнении пуансон перемещали в диапазоне скоростей от 0,5 до 3 мм/с и регистрировали нагрузку. Анализ результатов позволяет определить вариант размещения элементов в пресс-матрице, при котором напряжения приемлемы.

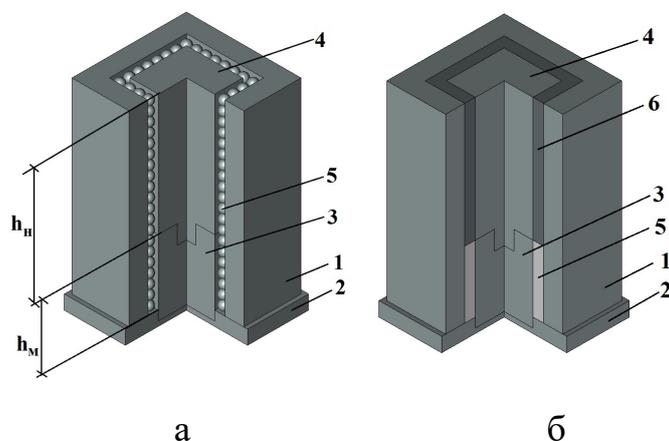


Рис.1. Начальная (а) и конечная (б) стадии процесса получения воскообразного слоя модели биметаллической отливки: 1 – пресс-матрица, 2 – основание; 3 – стальной каркас, 4 - удлиняющий элемент, 5 - сферические элементы, 6 - пуансон.

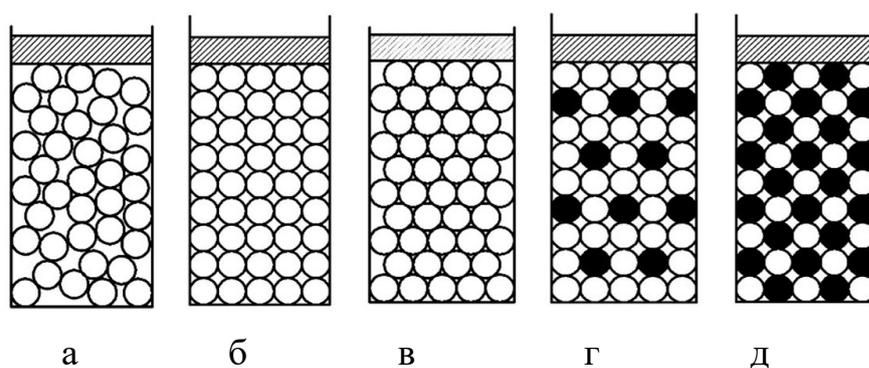


Рис. 2. Схемы начальной упаковки шарообразных элементов в пресс-матрице до деформации: а – свободная; б – тетрагональная; в – гексагональная; г – тетрагональная с 20% упругих элементов; д – тетрагональная с 50 % упругих элементов.

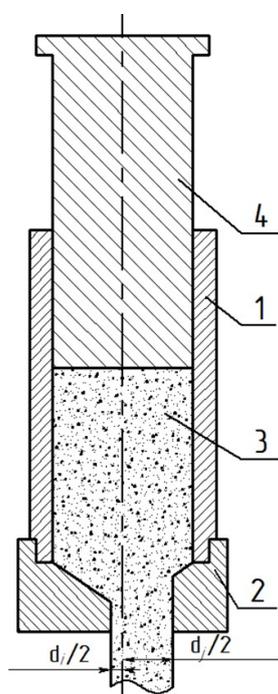


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования влияния диаметра диффузора на процесс мундштучного прессования.

носительных деформаций от напряжений.

Для исследования влияния технологических условий мундштучного прессования на стенд испытательной машины устанавливалась цилиндриче-

Для реализации компьютерного моделирования нагрузок, возникающих при одноосном уплотнении протяженных тонкостенных элементов прессовок, выполняемых из воскообразных порошков использован численный метод конечных элементов. Моделирование процесса развития деформации от поверхностного слоя частиц до охватывания всего порошкового тела пластической деформацией осуществляли в ходе эксперимента и численного расчета. Во избежание ошибок триангуляции в эксперименте сферические элементы заменены на цилиндрические в количестве 5 шт, и расположены одноосно. Для имитации водорастворимых компонентов уплотняемой системы выбран упругий материал, считаемый в эксперименте несжимаемым. Возможности применения метода конечных элементов для прогнозирования НДС прессовок, определяли в ходе сравнения экспериментальных и расчетных результатов, получаемых в виде зависимостей от-

ская пресс-форма диаметром 45 мм – 1 (как показано на рис.3). В нижней части пресс-формы расположена крышка с мундштуком 2. Диаметр мундштука 9 мм, что позволяет моделировать затрудненное истечение материала из пресс-формы. Соотношение площадей поперечных сечений диффузора и внутренней полости пресс-формы увеличивалось от 1/60 до 1/6. В пресс-форму помещали порошок 3 материала Т1 фракций 0,63 и 2,5 мм. Прессование осуществляли при помощи пуансона 4 при постоянной скорости в каждой серии исследования. Для разных серий экспериментов скорость перемещения пуансона изменялась в интервале 0,5 -1,5 мм/с.

Для определения размерно-геометрической точности длинномерной прессовки на выходе из диффузора с шагом 50 мм проводили измерение ее диаметра и строили зависимости распределения упругого отклика по длине прессовок от скорости перемещения пуансона для разных фракций Т1.

В третьей главе рассмотрены особенности НДС тонкостенных прессовок из материала Т1 при уплотнении в закрытой пресс-матрице. При формировании прессовок сложной геометрии участки разной толщины характеризуются различными плотностями, остаточными напряжениями и упругим откликом, что затрудняет прогноз размеров прессовки после релаксации.

Реологические свойства не конструкционного материала Т1 мало изучены, а экспериментально-аналитическое исследование его поведения при уплотнении в закрытой пресс-форме представляет интерес для промышленной реализации. Установлено, что прессование воскообразных порошков в закрытой матрице, характеризуется наложением стадий уплотнения. В ходе исследования процесса получения прессовок со значениями пористости $0\% \leq P_n \leq 12\%$ при уплотнении в закрытой пресс-форме порошка Т1 получены зависимости напряжения от плотности (рис.4) и пористости (рис.5). Черным цветом показаны кривые, характерные для Т1 фр. 2,5 мм, серым – для фр. 0,63 мм. Сплошными кривыми обозначены изменения напряжений для прессовок с $P_n = 0\%$, пунктирными – для $P_n = 12\%$. Зависимости показывают различия в напряжениях при формировании прессовок с разной пористостью

и незначительность влияния фракции материала на ход его уплотнения. С ростом Π различие значений σ_0 для разных фракций сокращается.

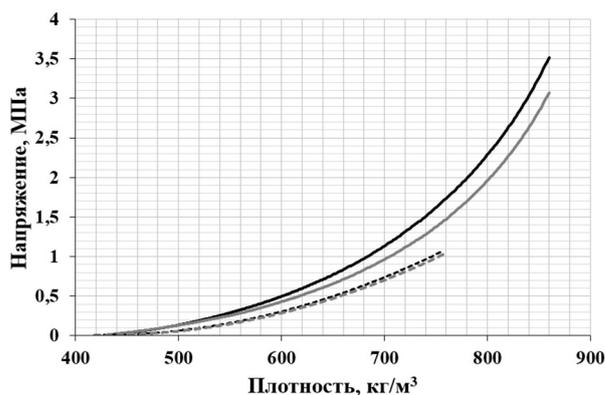


Рис.4. Зависимости напряжения от плотности материала Т1 при его прессовании.

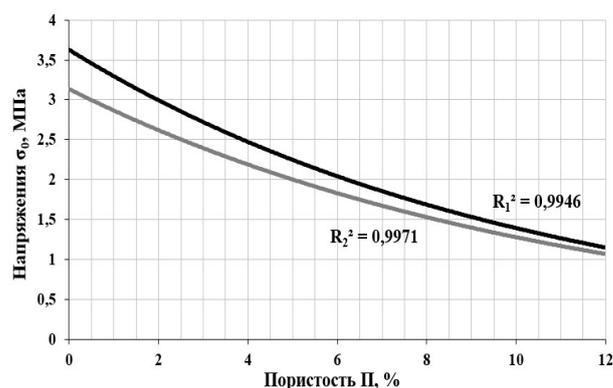


Рис.5. Полиномиальные зависимости напряжений от пористости.

Аппроксимация экспериментальных данных классической формулой Ждановича Г.Н., приводит к неудовлетворительным результатам, поэтому требуется подбор значения показателя степени m . Обратная зависимость плотности от давления приняла вид:

$$\rho = \rho_{max} \theta = \rho_{max} \left(\frac{P}{P_{max}} (1 - \theta_0^m) + \theta_0^m \right)^{\frac{1}{m}}$$

где P_{max} — значение давления, при котором плотность материала ρ достигла значения литой плотности ρ_{max} , $\theta = \rho/\rho_{max}$ — относительная плотность, $\theta_0 = \rho_0/\rho_{max}$ — относительная насыпная плотность, ρ_0 — насыпная плотность.

Расчетные зависимости давления при уплотнении порошка Т1 от относительной плотности прессовок сравнивались с экспериментальными. На рис.6 изображено сравнение кривых уплотнения порошка Т1 фр. 0,63, построенных с помощью расчета по формулам Бальшина М.Ю. (выполнена черным цветом), Ждановича Г.Н. (выполнена пунктиром) и полученная экспериментальным путем (выполнена серым цветом). Расчетные кривые не совпадают с экспериментальными данными, а разница в значениях составляет 15 – 20 %. Для уточнения аппроксимирующей функции подобрано численное значение показателя степени a в формуле Ждановича Г.Н., которое,

для материала Т1 фр. 0,63 мм составило 7,12. В результате получены кривые, соответствующие экспериментальным данным.

На геометрию прессовки влияют остаточные напряжения, определяющие упругий отклик, который может изменяться от времени выдержки прессовки под нагрузкой.

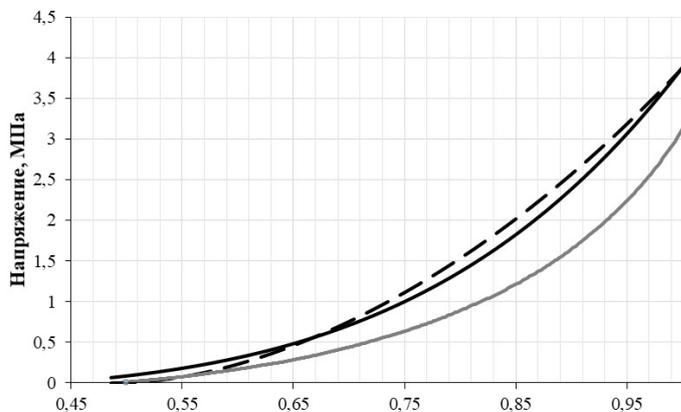


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей напряжения σ_i от относительной плотности θ .

В результате анализа зависимостей напряжений, характерных для релаксации прессовок, от времени их выдержки под нагрузкой установлено, что значения напряжений при релаксации в образцах с пористостью 0 % на 10 минуте испытания не превышают значений 0,13

МПа и для прессовок с пористостью 12 % на 5 минуте не превышают 0,08 МПа. Изменение напряжения в зависимости от размера фракции и пористости влияет на упругий отклик и прочность прессовки. Для прогнозирования прочности прессовок на сжатие введен показатель пропорциональности напряжений $N_{сж}$ (определяющий насколько напряжения, необходимые для уплотнения, больше предела прочности прессовки), рассчитываемый по формуле:

$$N_{сж} = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_0} \cdot 100\%$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности при сжатии, МПа; σ_0 – максимальные напряжения, возникающие на траверсе машины при уплотнении прессовки, МПа.

На основе зависимостей $N_{сж}$ от пористости P делается вывод об увеличении $N_{сж}$ с ростом пористости P . Причем, чем больше пористость, тем большее влияние имеет фракция материала. Так, для прессовки с $P = 6\%$, сформированной из Т1 фр. 2,5 мм, предел прочности $\sigma_{сж}$ составляет 50 % от значения σ_0 , необходимого для уплотнения этого порошкового материала

Для построения аналитических зависимостей напряжений σ_i в прессовке во время ее релаксации, определялись расчетные параметры τ и k для

их подстановки в аналитическое уравнение Кольрауша, позволяющее получить расчетные кривые релаксации уплотненного материала по времени. Значения τ и k для прессовок с пористостью $0\% \leq P \leq 12\%$ нелинейно уменьшаются. Экспоненциальную динамику падения значений экспериментальных и расчетных кривых можно считать совпадающей.

При исследовании влияния упаковки материала Т1 на напряженно-деформированное состояние прессовки, воскообразные сферические элементы помещались в пресс-форму согласно схеме (рис.2). Так имитировалось распределение компонентов, характерное для начала стадии деформирования порошкового тела. $\sigma_{0,5}/\sigma_3$ (МПа) - напряжения, полученные при скоростях перемещения пуансона 0,5 мм/с и 3 мм/с. Превышение скорости перемещения пуансона выше 3 мм/с приводит к неравномерности свойств в объеме прессовки и к большему упругому отклику. При выдержке уплотненного материала Т1 под нагрузкой отклонения размеров прессовки относительно внутренних размеров пресс-формы составляет 0,01% - 0,05 %.

При моделировании одноосного уплотнения длинномерных прессовок в закрытой пресс-форме установлена целесообразность компьютерного прогнозирования НДС только для малых деформаций. При физическом моделировании уплотнение прессовок с отношением ширины основания к высоте 1 к 5 разница в нагрузках незначительна. Увеличение отношения до 1 к 11 приводит к нестабильным нагрузкам, их резкому увеличению при значении деформации $\varepsilon \geq 24$ %. При изготовлении пористых выплавляемых моделей длинномерные поднутрения в пресс-формах должны конструироваться так, чтобы отношение ширины основания к высоте было меньше, чем 1 к 10.

Четвертая глава посвящена особенностям формирования НДС протяженных элементов прессовок из порошка Т1 при его экструзии из цилиндрического диффузора. В ходе изучения влияния на геометрию протяженной прессовки фракции материала и скорости экструзии (зависящей от скорости перемещения пуансона от 0,25 мм/с до 1,5 мм/с) из мундштука постоянного сечения определено давление начала экструзии. Отношение площадей сече-

ний длинномерной прессовки к площади поперечного сечения пресс-формы составляет 1 к 25. На рис.7 представлены зависимости нагрузки от перемещения пуансона для экструзии Т1 фр. 2,5 мм. Экструзия начинается по достижении материалом плотности литого состояния $\rho_{Т1} = 860 \text{ кг/м}^3$.

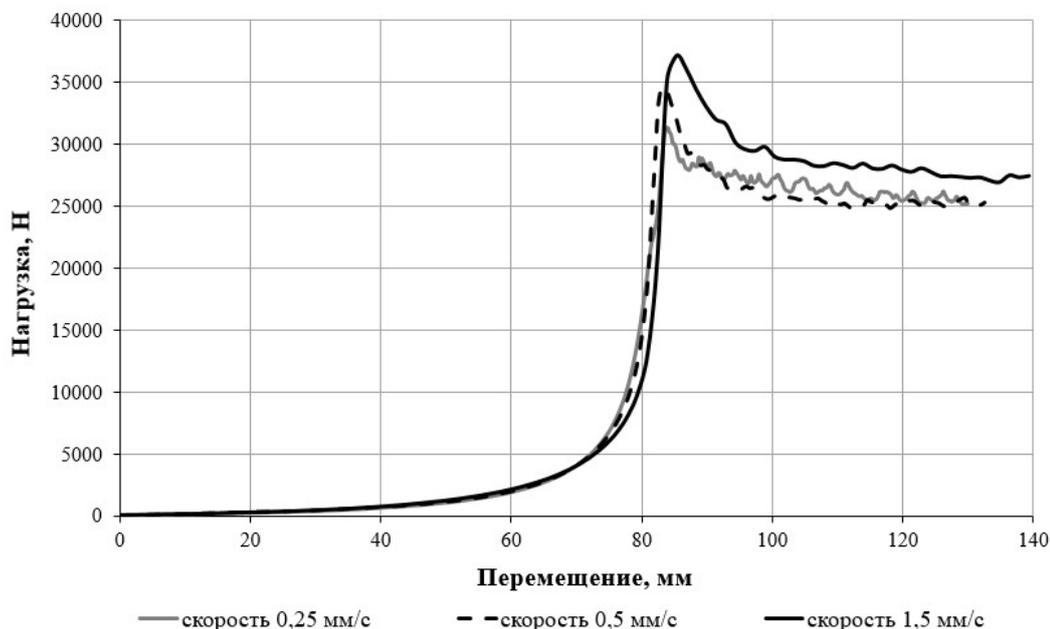


Рис.7. Влияние скорости перемещения пуансона на значение нагрузки.

Из рис.7 видно, что пиковая нагрузка 31 кН, соответствует началу выхода из мундштука длинномерной прессовки при скорости 0,25 мм/с, при скорости 0,5 мм/с это значение составляет 34 кН, при скорости 1,5 мм/с – 37 кН. На нагрузку при мундштучном прессовании Т1 меньшей фракции скорость перемещения пуансона оказывает большее влияние. При этом разница в нагрузках при начале экструзии не превышает 10 %. В ходе исследования влияния скорости перемещения пуансона и фракции порошка на характеристики экструзии построены зависимости температуры уплотняемого материала в зоне контакта мундштука и пресс-формы от скорости экструзии. Определено, что при изменении скорости экструзии в диапазоне 6-36 мм/с температура Т1 в представленной зоне увеличивается на 28-38%. Измерением размеров поперечного сечения прессовки по длине с шагом 50 мм определено влияние фракции Т1 и скорости его экструзии на упругий отклик. Упругий отклик прессовок, из Т1 фр. 2,5 мм, превышает значения упругого отклика

для прессовок из фр. 0,63 мм в среднем на 10 % – 20 %. Превышение скорости перемещения пресс-пуансона приводит к появлению усадки.

При исследовании влияния скорости перемещения пуансона пресс-формы, фракции порошка и формы мундштука на геометрию прессовки, формируемой в процессе экструзии порошка Т1, определена предпочтительность скорости пуансона 0,5 мм/с при конической форме диффузора (не наблюдается усадки, упругий отклик незначительно отличается от отклонений размеров прессовок, полученных при скорости пуансона 0,25 мм/с).

Экспериментально исследовано влияние отношения площадей поперечных сечений диффузора и пресс-формы на нагрузку, возникающую при экструзии и плотность прессовок. Получены экспоненциальные зависимости нагрузки от отношения площади поперечных сечений пресс-формы и диффузора, изменяющихся в интервале значений от 1/60 до 1/5.

Для длинномерной прессовки диаметром 20 мм, при соотношении площадей 1/5, наблюдается максимальная разница в значениях нагрузки при изменении фракции порошка. При увеличении фракции Т1 происходит рост нагрузки на 37 %. С увеличением соотношения площадей плотность длинномерной прессовки уменьшается. /Установлено, что для формирования бездефектного тонкостенного длинномерного элемента прессовки соотношение площадей поперечных сечений пресс-формы и диффузора для порошка Т1, должно находиться в интервале от 0,025 до 0,1, при пористости не выше 5 %.

Заключение

1. В результате экспериментального исследования определен модуль Юнга воскообразного материала (парафина) марки Т1 – $E = 81,91$ МПа, участвующий в задании условий компьютерного моделирования уплотнения.
2. При исследовании уплотнения воскообразного порошка в закрытой пресс-форме установлено, что на напряжения, регистрируемые на пресс-пуансоне влияет фракция материала и значение пористости прессовки.
3. Определено, что наименьший упругий отклик соответствует прессовкам, полученным с пористостью Π в диапазоне от 8% до 12%. Для минимизации

ции упругого отклика материала после завершения процесса прессования, необходима релаксация напряжений прессовки, осуществляемая путем ее выдержки под нагрузкой при сомкнутых элементах пресс-формы. Снижение величины остаточных напряжений более чем на 90 % происходит: для порошка воскообразного материала фракции 2,5 мм на 10-й минуте выдержки; для фракции 0,63 мм – на 5-й минуте выдержки.

4. Полученные результаты расчетного моделирования направлены на возможность реализации в производственных условиях прогнозирования: напряженно-деформированного состояния элементов пористых выплавляемых моделей во время их уплотнения в закрытой пресс-матрице; осуществления релаксации остаточных напряжений прессовки; обеспечение прочности на сжатие готовой пористой выплавляемой модели.
5. При исследовании влияния начальной упаковки частиц порошка на процесс уплотнения установлено, что основное влияние на величину напряжений оказывает насыпная плотность порошкового материала. Чем выше насыпная плотность, тем выше значения напряжений, необходимых для уплотнения однокомпонентного воскообразного материала. При формировании двухкомпонентных пористых прессовок основное влияние на значения напряжений оказывает не насыпная плотность, а доля содержания упругих недеформируемых элементов по объему прессовки. Увеличение содержания упругих элементов приводит к неравномерности распределения свойств прессовки по объему и увеличению значений упругого отклика, что является следствием повышения напряжений в прессовке.
6. В результате компьютерного моделирования уплотнения длинномерной прессовки установлено, что прогнозирование процесса возможно только при малых значениях деформаций и только с применением таких исследовательских инструментов, как: физическое и численное моделирование.
7. В ходе исследования процесса экструзионного формирования элементов длинномерной прессовки установлено, что для получения прессовок с минимальным упругим откликом предпочтительно использование коническо-

го диффузора при скорости перемещения пресс-пуансона 0,5 мм/с при отношении площадей поперечных сечений пресс-матрицы и диффузора 1 к 25 и отношении высоты насыпки к диаметру пресс-матрицы 3 к 1.

8. При исследовании влияния отношения площадей поперечных сечений внутренней полости пресс-формы и диффузора на получение бездефектных длинномерных элементов выплавляемой модели установлено, что максимально возможная их пористость составляет 5 %. Отношение площадей поперечных сечений должно находиться в диапазоне от 0,025 до 0,1.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

В продолжении работы планируется получение новых результатов и рекомендаций по напряженно-деформированному состоянию объемных порошковых многокомпонентных тел, что обеспечит широкую номенклатуру прессовок, предназначенных для применения в машиностроительных процессах.

Основные публикации по теме диссертации:

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных:

1. *Bogdanova N.A.* Finite element modeling of the stress-strain state of waxy compacts A.A. Sosnin, N.A. Bogdanova, S.G. Zhilin, O.N. Komarov / AIP Conference Proceedings. Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2019 - Proceedings of the 13th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures. – 2019. – P. 030017. **(WoS, Scopus, РИНЦ)**
2. *Bogdanova N.A.* Influence of the channel diameter ratio during extrusion forming of a paraffin powder body on compacting parameters / N.A. Bogdanova, S.G. Zhilin, O.N. Komarov / AIP Conference Proceedings. 14th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS2020. Ekaterinburg, –2020. –P.030003. **(WoS, Scopus, РИНЦ)**
3. *Богданова Н.А.* Влияние упаковки и параметров одноосного уплотнения сферических воскообразных элементов на напряженно-деформированное состояние прессовки/ С.Г. Жилин, Н.А. Богданова, О.Н. Комаров // Металлург. – 2022. –№ 8. – С. 83-93. **(WoS, Scopus, РИНЦ)**

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК:

4. *Богданова Н.А.* Влияние упругого отклика на размерно-геометрические характеристики протяженной прессовки, полученной из воскообразного материала мундштучным выдавливанием // С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.А. Соснин, Н.А. Богданова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20. № 2. – С. 27-34. **(ВАК, РИНЦ)**
5. *Богданова Н.А.* Экспериментальное моделирование технологических этапов процесса формирования биметаллической отливки высокой размерно-геометрической точности / Е.Е. Абашкин, Н.А. Богданова, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, В.В. Предеин // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2020. – № 4 (46). – С. 25-35. **(ВАК, РИНЦ)**
6. *Богданова Н.А.* Условия формирования протяжённой прессовки из воскообразного материала при экструзионном выдавливании порошкового тела / Н.А. Богданова, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2021. – № 3 (51). – С. 73-75. **(ВАК, РИНЦ)**
7. *Богданова Н.А.* Расчетное и экспериментальное определение параметров процесса формирования пористой прессовки из порошкового воскообразного материала / С.Г. Жилин, Н.А. Богданова, О.Н. Комаров // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2022. – №3(53). – С. 27-38. **(ВАК, РИНЦ)**

Материалы конференций:

8. *Богданова Н.А.* Особенности формирования слоя воскообразного материала при напрессовке на пористую твердую основу / Н.А. Богданова, Б.М. Назаров, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, А.А. Соснин // Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных техноло-

- гий, технических устройств и конструкций. Материалы докл. III Дальневосточной школы-семинара. Отв. ред. А.И. Евстигнеев. –2018. –С. 10-12.
9. *Богданова Н.А.* Особенности напряженно-деформированного состояния прессовок из воскообразного материала при изменении начальной упаковки компонентов // Н.А. Богданова, Б.М. Назаров, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров // *Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении. Материалы V Дальневосточной конференции с международным участием.* Отв. ред. А.И. Евстигнеев. – 2018. – С. 63-68.
10. *Богданова Н.А.* Технологические аспекты формирования биметаллических отливок повышенной размерно-геометрической точности / С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, Н.А. Богданова // *Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии. Тезисы докладов Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения основателя и первого директора ИФПМ СО РАН академика Виктора Евгеньевича Панина в рамках Международного междисциплинарного симпозиума "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций".* – 2020. – С. 590-591.
11. *Богданова Н.А.* Принципы формирования биметаллических отливок повышенной размерно-геометрической точности / Н.А. Богданова, С.Г. Жилин, О.Н. Комаров // *Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в металлургии и машиностроении. Материалы VI Дальневосточной конференции с международным участием. Комсомольск-на-Амуре, 2022.* – С. 79-81.

Патенты РФ:

12. Пат. № 2697995 РФ, Способ получения биметаллической отливки / Жилин С.Г., Комаров О.Н., Богданова Н.А.; опубл. 21.08.2019, Бюл. 24.
13. Пат. № 2696118 РФ, Способ получения биметаллической отливки / Богданова Н.А., Жилин С.Г., Комаров О.Н.; опубл. 31.07.2019, Бюл. 22.