


На правах рукописи



**Богданова Нина Анатольевна**

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ  
СОСТОЯНИЕ 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 – 2026

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:** **Панин Сергей Викторович**, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией механики полимерных композиционных материалов, ФГБУН «Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина» СО РАН, г. Томск  
**Григорьев Ян Юрьевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, и.о. ректора, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем машиноведения» Российской Академии наук (ИПМаш РАН), г. Санкт-Петербург

Защита состоится 4 июня 2026 г. в 10:30 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](http://www.knastu.ru).

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

Автореферат разослан “ 9 ” апреля 2026 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 высокой точности и сложной конфигурации производят литьем по выплавляемым моделям (ЛВМ). Значительное число и продолжительность операций, широкая 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 (ВМ) достигается при их получении прессованием порошков воскообразных материалов. При изготовлении ВМ прессованием порошка воскообразного материала негативное влияние теплофизических явлений не проявляется. Однако при формировании изделий с участками разной толщины и протяженности в теле прессовки после снятия нагрузки возникают напряжения, искажающие ее геометрию. Регулирование параметров уплотнения и релаксации материала прессовки направлено на решение актуальной проблемы устранения упругого отклика и расширение номенклатуры точных биметаллических отливок.

В качестве материала для изготовления ВМ традиционным способом широко распространены воскообразные модельные композиции на основе парафина с добавками. Использование парафина как самостоятельного материала для изготовления выплавляемых моделей не распространено ввиду его большой усадки по сравнению, например, с парафиностеариновыми составами. Однако очевидные преимущества парафина – достаточная прочность, широкая доступность и низкая стоимость определяют практический интерес для расширения области его использования. Изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) порошковых воскообразных тел при одноосном уплотнении обусловлено необходимостью получения новых знаний для выработки рекомендаций, связанных с:

- технологическими операциями формирования прессованных пористых изделий без дефектов теплофизической природы (упругого отклика, поверхностных дефектов);
- режимами формирования протяженных и/или тонкостенных элементов пористых прессовок сложной конфигурации;
- последующим математическим моделированием и прогнозированием процессов деформирования такого рода материалов.

Актуальность работы подтверждается проведением исследований в рамках плана НИР ФГБУН ИМиМ ДВО РАН на 2018-2020, 2019-2021 и 2022-2026 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 (ММ) в пресс-форму; изготовлению модельного блока, нанесению и сушке слоев огнеупорной керамической ОФ; выплавлению ВМ, прокатке 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 ММ 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 ММ (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 пространственной конфигурацией остаются нерешенными в силу различий в напряжениях участков прессовок, отличающихся по протяженности и толщине, что приводит к появлению неравномерного упругого отклика, значения 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 напряжения прессования. Результаты теоретических и экспериментальных исследований Бальшина М.Ю. и Ждановича Г.Н. в области деформационного механизма уплотнения порошковых сред 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:**

Экспериментальное определение технологически обоснованных режимов формирования выплавляемых моделей (в том числе моделей биметаллических отливок) из порошкового воскообразного материала для минимизации внутренних напряжений в них.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи, устанавливающие закономерности:

1. Испытания однокомпонентных воскообразных порошковых материалов на одноосное стесненное сжатие с варьированием начальной пористости, величины фракции и скорости нагружения;

2. Исследования релаксации напряжений образцов из однокомпонентных воскообразных порошковых материалов при выдержке после одноосного стесненного сжатия в зависимости от начальной пористости, величины фракции и скорости нагружения;
3. Зависимость плотности образцов из воскообразного порошкового материала, уплотняемых центробежными силами, от скорости вращения цилиндрической пресс-матрицы;
4. Разрушение при деформировании одноосным свободным сжатием образцов в зависимости от параметров их изготовления одноосным стесненным сжатием однокомпонентных воскообразных порошковых материалов;
5. Влияние скорости деформирования и начальной упаковки воскообразных материалов, выполненных в виде сферических элементов, на напряженно-деформированное состояние прессовок, имитирующих формирование поверхности из воскообразного материала на каркасе-основе;
6. Влияние скорости экструзии и величины фракции при холодном экструзионном формовании прессовок из однокомпонентных воскообразных материалов на требуемое усилие и упругий отклик протяженной прессовки.

#### **Методы исследований.**

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 выплавляемых моделей биметаллических отливок, для которых реализован эксперимент; способы получения выплавляемых моделей отливок тел вращения.

Экспериментальные исследования проводились с использованием современного измерительного оборудования, обеспечивающего высокую точность и надёжность измерений, а также воспроизводимость получаемых данных.

#### **Научная новизна работы.**

1. Определено влияние предустановленных значений пористости прессовок, фракции и скорости деформирования порошковых материалов на напряженно-деформированное состояние прессовок, формируемых одноосным стесненным сжатием;
2. Определено время выдержки образцов в нагруженном состоянии для релаксации созданных напряжений при прессовании в зависимости от начальной фракции порошкового материала и получаемой пористости согласно полученным экспериментальным данным;
3. Установлена степень снижения угловой скорости вращения уплотняемой системы, состоящей из порошковых воскообразных материалов, за счет присоединенной массы для достижения необходимой пористости образцов;
4. Определено влияние начальной упаковки воскообразных материалов, выполненных в виде сферических элементов, имитирующих частицы порошков, на напряженно-деформированное состояние процесса формирования воскообразной поверхности, получаемой одноосным стесненным сжатием;

5. Экспериментально определено влияние соотношения площадей поперечного сечения цилиндрической пресс-матрицы и диффузора, скорости экструзии и формы диффузора при деформировании воскообразных порошков на значения плотности и упругого отклика материала длинномерных прессовок, моделирующих тонкостенные элементы выплавляемых моделей биметаллических отливок.

Изобретательская новизна по теме работы подтверждается 4 патентами РФ на изобретение №2696118 «Способ получения биметаллической отливки», №2697995 «Способ получения биметаллической отливки», № 2757139 «Способ получения выплавляемой модели тела вращения», № 2768661 «Способ получения выплавляемой модели».

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

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Заключение по результатам серии направленных экспериментов по созданию образцов задаваемой пористости прессованием воскообразного порошкового материала различных фракций, оценки воздействий (усилия, скорости перемещения пресс-пуансона и т.д.) на деформируемый материал, формирующих структуры с различной пористостью;
2. Экспериментально установленные значения времени выдержки образцов в нагруженном состоянии с целью релаксации напряжений в них до назначаемого уровня в зависимости от достигнутой пористости в них;
3. В ходе серии экспериментов определено, что для уплотнения до заданных значений пористости выплавляемых моделей тел вращения в поле действия центробежных сил необходима скорость вращения пресс-матрицы в диапазоне от 6000 до 15000 об/мин. Уплотнение с присоединенной массой позволяет снизить угловую скорость вращения до 4000 об/мин;
4. Экспериментально установлено, что прочность на сжатие образцов, сформированных в поле действия центробежных сил, уступает значениям прочности образцов, полученных в результате стесненного сжатия при прямом одноосном прессовании (около 15 %), что является достаточным для их дальнейшего технологического использования;
5. Опытным путем показано, что на уплотнение прессовок, имитирующих слой воскообразного порошкового материала на каркасе-основе, основное влияние оказывает скорость перемещения пресс-пуансона и плотность упаковки шарообразных элементов. При увеличении скорости деформирования с 0,5 мм/с до 3 мм/с происходит увеличение значений напряжений, необходимых для уплотнения прессовок на 28 и 38 % соответственно.
6. Экспериментально определено положительное влияние конической формы диффузора на величину упругого отклика протяженных прессовок из воскообразных порошковых материалов, получаемых экструзионным формованием; причем соотношение площадей диффузора и внутренней полости пресс-матрицы должно находиться в диапазоне от 0,025 до 0,1. При увеличении скорости экструзии от 6 мм/с до 36 мм/с происходит увеличение максимальной нагрузки, соответствующей началу выхода материала из диффузора, на 19 % - 29% в зависимости от фракции воскообразного порошкового материала;

**Практическая значимость работы** заключается в экспериментальном установлении закономерностей деформирования порошков воскообразных материалов, применяемых для получения пористых выплавляемых моделей (в том числе выплавляемых моделей биметаллических отливок) и/или их элементов повышенной размерной и геометрической точности, с технологически приемлемыми значениями пористости и не имеющих дефектов теплофизической природы. Полученные в результате серий экспериментов закономерности предназначены для осуществления последующего математического моделирования и прогнозирования процессов получения прессовок из такого рода материалов.

**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, 2018-2025 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 гг.; на XXX Международном симпозиуме им. А.Г. Горшкова «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», г. Москва, 2024 г.; на XVIII-ой международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург, 2024 г.; на XXIV-ой Зимней школе по механике сплошных сред. г. Пермь, 2025 г.; на VIII-ой Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления», г. Хабаровск. 2025 г.; на IV Всероссийской научно-практической конференции «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, 2025 г.

**Личный вклад автора.** Обоснование целей и задач, выбор материалов и методик, проведение экспериментов, обработка и описание экспериментальных результатов, составившие предмет диссертации, получены автором лично. С соавторами публикаций (С.Г. Жилин, О.Н. Комаров, И.Э. Келлер), принявшими участие в выборе темы, обсуждены и согласованы полученные результаты.

**Публикации.** Основные результаты исследований и содержание диссертационной работы опубликованы в 23 печатных работах, из них 8 включены в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Получены 4 патента РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов по работе, списка использованной литературы, приложений. Диссертация изложена на 150 страницах, содержит 43 рисунка, 7 таблиц, список использованной литературы из 160 наименований, 4 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. Обозначены цель и задачи, представлены актуальность исследования, 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: заливка жидкой модельной композиции в пресс-матрицу; заливка расплава 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 нагревающегося материала). Процессы получения ВМ в результате аддитивного формирования или механической обработкой 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 теоретического 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 1969 году Г.М. Ждановичем в своей монографии представлен подробный анализ существующих на тот момент уравнений прессования и приводится ряд эмпирических зависимостей уплотнения порошковых материалов. На структуру и физико-механические свойства заготовки влияют насыпная плотность, гранулометрический состав и расположение частиц исходного материала. Номенклатура используемых материалов (в т.ч. не конструкционных) 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 стесненным сжатием при прямом одноосном прессовании и прессовании в поле действия центробежных сил, а также в ходе экструзионного формования, имитирующего изготовление тонкостенных элементов ВМ.

Представлена целесообразность использования в экспериментах порошкового материала марки Т1, являющегося компонентом парафино-стеаринового 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.

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 стесненном сжатии порошкового тела и напряжений при релаксации материала от времени его выдержки под нагрузкой.

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  $\tau$  и  $k$  регрессионной зависимости определяли с помощью метода наименьших квадратов, применяя его к экспоненциальной функции.

Расширение предложенного способа изготовления пористых выплавляемых моделей путем стесненного сжатия при уплотнении порошков воскообразных материалов в поле действия центробежных сил, позволяет получать выплавляемые модели в виде тел вращения, конфигурация внешней поверхности которых задается вращающейся пресс-формой. Актуальность исследований в обозначенном направлении продиктована необходимостью поиска энергоэффективного варианта формирования прессовок, обеспечивающего снижение скорости вращения формы при обеспечении технологически приемлемых значений плотности прессовок.

Прочностные характеристики цилиндрических пористых выплавляемых моделей с различной пористостью, получаемых стесненным сжатием, исследовались с помощью свободного сжатия на универсальной испытательной машине «AG-X plus Shimadzu».

При моделировании НДС воскообразной пористой поверхности на каркасе-основе использованы сферические компоненты, располагаемые в один слой в пресс-матрице по схемам формирования элемента модели биметаллической отливки (рис.1 и 2). При их уплотнении пресс-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.

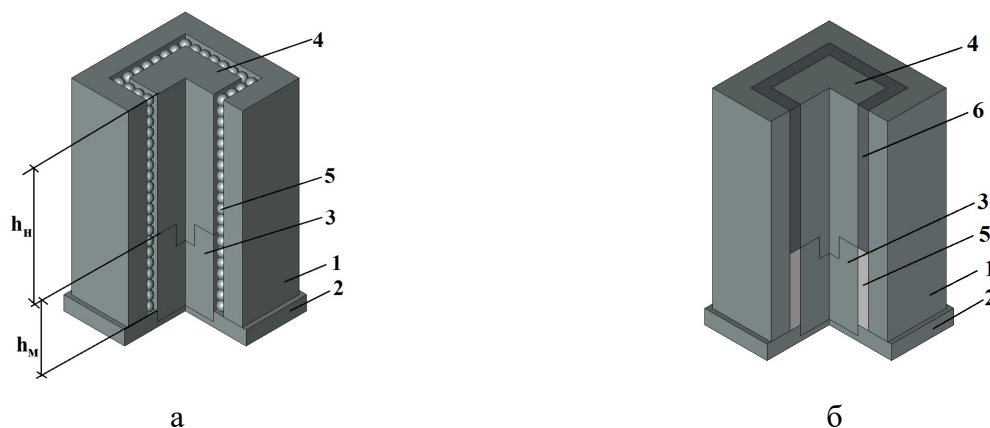


Рис.1. Начальная (а) и конечная (б) стадии процесса получения воскообразного слоя модели биметаллической отливки: 1 – пресс-матрица, 2 – основание; 3 – стальной каркас, 4 - удлиняющий элемент, 5 - сферические элементы, 6 - пуансон.

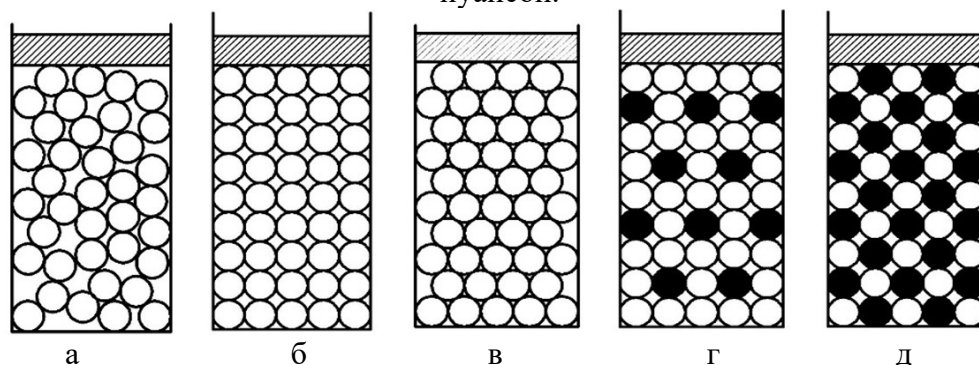


Рис. 2. Схемы начальной упаковки шарообразных элементов в пресс-матрице до деформации: а – свободная; б – тетрагональная; в – гексагональная; г – тетрагональная с 20% упругих элементов; д – тетрагональная с 50 % упругих элементов.

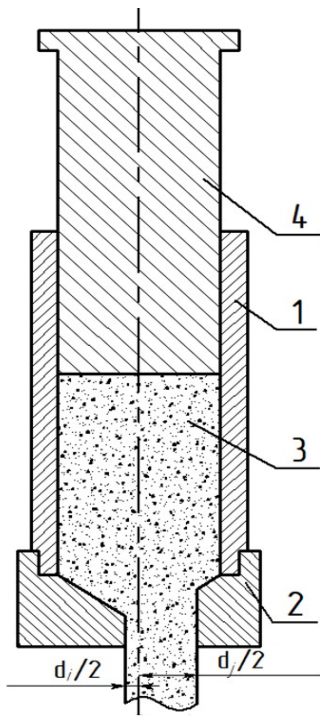


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования влияния диаметра диффузора на процесс мундштучного прессования.

Для исследования влияния технологических условий экструзионного формования на стенд испытательной машины устанавливалась цилиндрическая пресс-матрица диаметром 45 мм – 1 (как показано на рис.3). В нижней части пресс-матрицы расположена крышка с диффузором 2. Диаметр диффузора 9 мм, что позволяет моделировать затрудненное истечение материала. В пресс-матрицу помещали порошок 3 материала Т1 фракций 0,63 и 2,5 мм. Прессование осуществляли при помощи пресс-пуансона 4 при постоянной скорости в каждой серии исследования. Для разных серий экспериментов скорость перемещения пуансона изменялась в интервале 0,25 – 1,5 мм/с. Для определения влияния размера диффузора на процесс экструзионного формования длинномерной прессовки соотношение площадей поперечных сечений диффузора и внутренней полости пресс-матрицы изменялось от 1/60 до 1/5.

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 пресс-пуансона для разных фракций Т1.

**В третьей главе** рассмотрены особенности НДС прессовок из материала Т1 при стесненном сжатии, в том числе и в условиях уплотнения в поле действия центробежных сил. При формировании прессовок сложной геометрии участки разной толщины характеризуются различными плотностями и остаточными напряжениями, 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. Воскообразные порошковые материалы при деформировании проявляют вязкоупругопластические свойства, а стесненное сжатие воскообразных порошков, характеризуется наложением стадий уплотнения.

В ходе исследования процесса получения прессовок со значениями пористости  $0\% \leq P_n \leq 12\%$  при стесненном сжатии 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  $P_n$  различие значений  $\sigma_0$  для разных фракций сокращается.

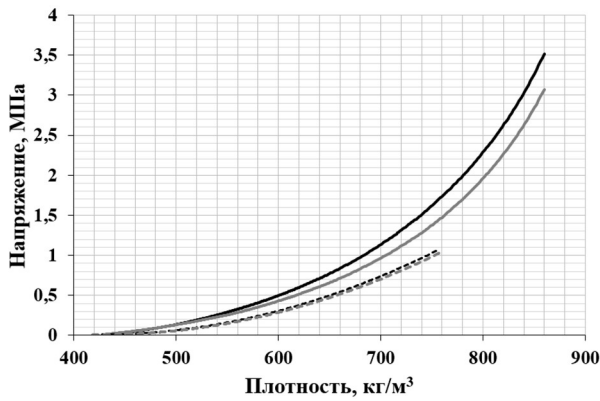


Рис.4. Зависимости напряжения от плотности материала Т1 при его прессовании.

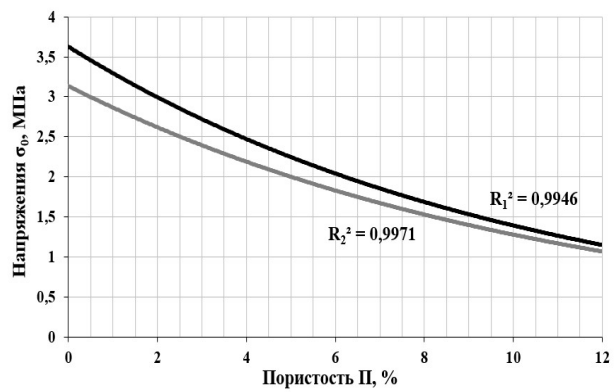


Рис.5. Полиномиальные зависимости напряжений от пористости.

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  $\rho$  достигла значения литой плотности  $\rho_{max}$ ;  $\theta = \rho/\rho_{max}$  — относительная плотность,  $\theta_0 = \rho_0/\rho_{max}$  — относительная насыпная плотность,  $\rho_0$  — насыпная плотность.

Расчетные зависимости давления при уплотнении порошка Т1 от относительной плотности прессовок сравнивались с экспериментальными. На рис.6 изображено сравнение

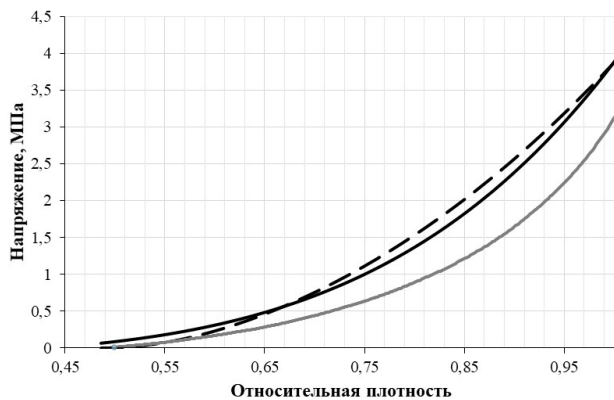


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей напряжения  $\sigma_i$  от относительной плотности  $\theta$ .

кривых уплотнения порошка Т1 фр. 0,63, построенных с помощью расчета по формулам Бальшина М.Ю. (пунктирная, выполнена черным цветом), Ждановича Г.Н. (сплошная, выполнена черным цветом) 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. В результате анализа зависимостей напряжений, характерных для релаксации прессовок, от времени их выдержки под нагрузкой, представленных на рис. 7, 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 построения аналитических зависимостей напряжений  $\sigma_i$  в прессовке во время ее релаксации, определялись расчетные параметры  $\tau$  и  $k$  для их подстановки в аналитическое уравнение Кольрауша, позволяющее получить расчетные кривые релаксации уплотненного материала по времени. Значения  $\tau$  и  $k$  для прессовок с пористостью  $0\% \leq \Pi \leq 12\%$  нелинейно уменьшаются. Экспоненциальную динамику падения значений экспериментальных и расчетных кривых можно считать совпадающей.

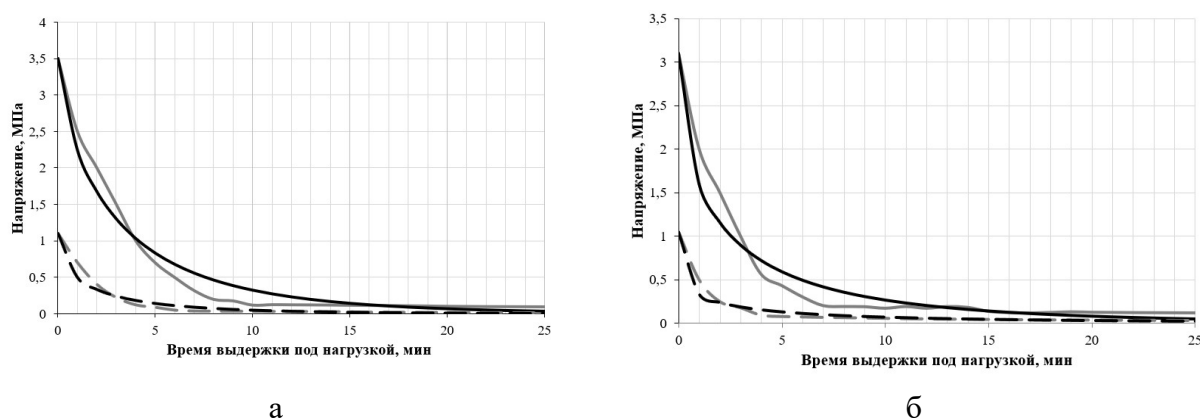


Рис. 7 Сравнение экспериментальных и расчетных кривых релаксации напряжений пористой прессовки, формирующейся из воскообразного порошкового материала марки Т1 двух фракций: а – 2,5 мм; б – 0,63 мм.

Формирование пористых прессовок уплотнением порошковых воскообразных материалов в поле действия центробежных сил позволяет получать выплавляемые модели тел вращения в условиях, обеспечивающих авторегулирование процесса распределения плотности прессовки в направлении от центра вращения порошкового тела к его периферии. Установлено, что для получения прессовки из порошкового парафина марки Т1 фракции 0,63 мм с интервалом пористости 0 – 10% скорость вращения ротора центрифуги должна составлять от 6000 до 15000 об/мин. Для обеспечения прогнозируемой плотности (и, следовательно, пористости) формируемых прессовок в каждой точке, расположенной на одинаковом удалении от центра вращения, при технологически приемлемых значениях угловых скоростей центрифуги, определяют варианты использования добавочных масс для снижения значений скорости вращения цилиндрической пресс-формы, при которых обеспечиваются требуемые значения пористости прессовок. Уплотнение прессовок по обозначенному выше варианту осуществляется в два этапа: на первом ротор центрифуги вращается со скоростью от 3000 до 4000 об/мин, что позволяет увеличить плотность порошка воскообразного модельного материала на 10 – 15 %; на втором – после присоединения стального пуансона, применяемого в качестве добавочной массы, пресс-форму вращали со скоростью 3500 – 4000 об/мин в течение 7 минут, что обеспечивало получение прессовок с усредненной пористостью от 0 % до 10 % без поверхностных дефектов. По завершении процесса уплотнения порошка воскообразного модельного материала в поле действия центробежных сил получали прессовки в виде тел вращения (с минимальными значениями внутренних напряжений), у которых отсутствовали нарушения геометрии, связанные с упругим откликом уплотненного материала.

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;  $\sigma_0$  – максимальные напряжения, возникающие на траверсе машины при уплотнении прессовки, МПа.

На основе зависимостей  $N_{сж}$  от пористости  $\Pi$  делается вывод об увеличении  $N_{сж}$  с ростом пористости  $\Pi$ . Причем, чем больше пористость, тем большее влияние имеет фракция материала. Так, для прессовки с  $\Pi = 6\%$ , сформированной из Т1 фр. 2,5 мм, предел прочности  $\sigma_{сж}$  составляет 50 % от значения  $\sigma_0$ , необходимого для уплотнения этого порошкового

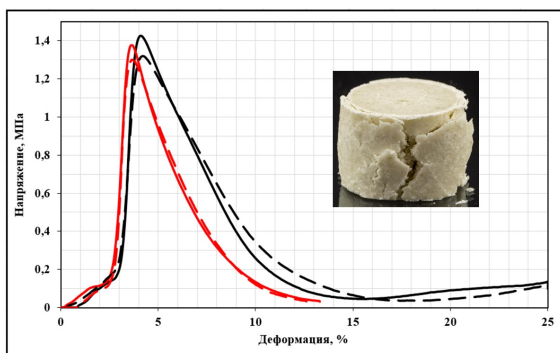


Рис. 8. Зависимость напряжения от деформации при вертикальном одноосном сжимающем нагружении цилиндрических образцов

материала.

Анализом зависимостей напряжения от деформации, представленных на рис. 8, при свободном сжимающем нагружении цилиндрических образцов установлено, что прочность на сжатие образцов, сформированных в поле действия центробежных сил уступает значениям прочности прессовок, полученных в результате одноосного прямого прессования в среднем на 15%, что, однако, является достаточным для реализации задачи их дальнейшего технологического использования.

**Четвертая глава** посвящена особенностям формирования на каркасе-основе слоя воскообразного модельного материала.

Таблица 1. Изменение напряжений в зависимости от деформации.

Деформация, %		Напряжение ( $\sigma_{0,5}/\sigma_3$ ), МПа			
		10	20	30	40
Варианты размещения элементов в пресс-матрице	а	0,05/0,15	0,28/0,41	0,5/0,57	0,61/0,76
	б	0,31/0,48	0,53/0,69	0,68/0,82	0,89/1
	в	0,42/0,53	0,6/0,72	0,68/0,89	0,81/1,2
	г	0,39/0,39	0,6/0,61	0,71/0,84	0,89/1,2
	д	0,4/0,47	0,65/0,68	0,87/0,93	1,19/1,42

При исследовании влияния упаковки материала Т1 на напряженно-деформированное состояние прессовки, воскообразные сферические элементы помещались в пресс-форму согласно схеме (рис.2). В таблице 1 показано изменение напряжений в зависимости от деформации при моделировании распределения сферических компонентов 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 большому упругому отклику. При выдержке уплотненно-

го материала Т1 под нагрузкой отклонения размеров прессовки относительно внутренних размеров пресс-формы составляют 0,01% - 0,05 %.

Исследовалось НДС протяженных элементов прессовок из порошка Т1 при его экструзионном формовании 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 прямого диффузора постоянного сечения (отношение площади поперечного сечения длиномерной прессовки к площади поперечного сечения пресс-матрицы составляет 1 к 25) определены усилия в момент начала экструзии. На рис.9 представлены зависимости нагрузки от перемещения пуансона для экструзионного формования Т1 фр. 2,5 мм. Экструзия начинается по достижении материалом плотности литого состояния  $\rho = 860 \text{ кг/м}^3$ . Черная сплошная линия соответствует процессу формования при скорости экструзии 36 мм/с, черная пунктирная линия – 12 мм/с, серая сплошная линия – 6 мм/с.

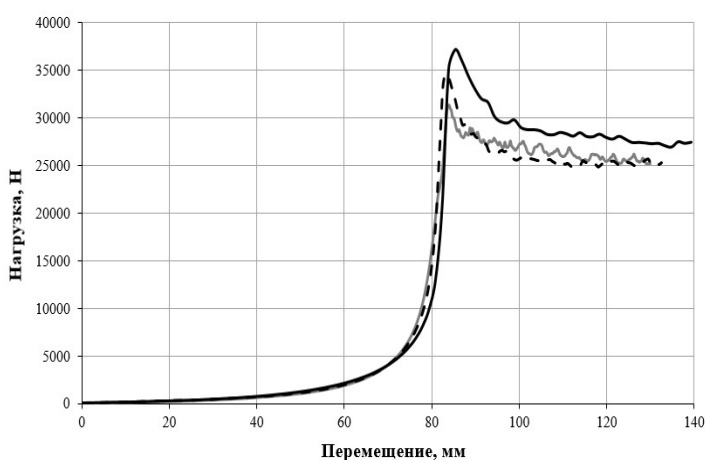


Рис.9. Влияние скорости перемещения пресс-пуансона на значение нагрузки.

Из рис.9 видно, что пиковая нагрузка 31 кН, соответствует началу выхода из мундштука длиномерной прессовки при скорости экструзии 6 мм/с, при скорости 12 мм/с это значение составляет 34 кН, при скорости 36 мм/с – 37 кН. На нагрузку при экструзионном формовании Т1 меньшей фракции скорость перемещения пуансона оказывает большее влияние. При этом разница в нагрузках при начале экструзии не превышает 10 %.

Из рис.9 видно, что пиковая нагрузка 31 кН, соответствует началу выхода из мундштука длиномерной прессовки при скорости экструзии 6 мм/с, при скорости 12 мм/с это значение составляет 34 кН, при скорости 36 мм/с – 37 кН. На нагрузку при экструзионном формовании Т1 меньшей фракции скорость перемещения пуансона оказывает большее влияние. При этом разница в нагрузках при начале экструзии не превышает 10 %.

Таблица 2. Изменение величины пиковой нагрузки

Фракция, мм	Скорость экструзии, мм/с	Пиковая нагрузка, Н		Уменьшение значений нагрузки, %
		Прямая форма диффузора	Коническая форма диффузора	
2,5	6	31305,47	22763,33	27,3
	12	34557,34	23815,71	31,2
	36	37209,35	25762,6	30,7
0,63	6	22682,51	19573,77	13,7
	12	25723,82	20350,26	20,8
	36	29060,48	24618,74	15,2

При изменении формы диффузора на коническую происходит снижение значений усилий необходимых для экструзионного формования длиномерных прессовок, эта разница представлена в таблице 2.

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 материала прессовок.

При исследовании влияния скорости экструзии, фракции порошка и формы диффузора на геометрию прессовки, формируемой в процессе экструзионного формования порошка Т1, определена предпочтительность скорости пуансона 0,5 мм/с при конической форме диффузора (не наблюдается усадка, упругий отклик незначительно отличается от отклонений размеров прессовок, полученных при скорости пуансона 0,25 мм/с). На рис.10 представлены кривые распределения упругого отклика по длине прессовок, выполненных из порошка воскообразного материала фракции 2,5 мм, черная сплошная линия характерна для экструзии материала при скорости 6 мм/с, серая пунктирная для скорости 12 мм/с, серая – 36 мм/с.

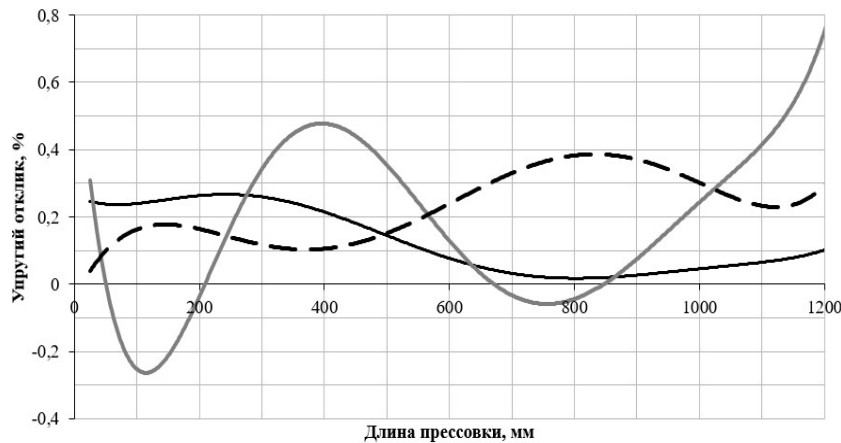


Рис.10. Распределение упругого отклика по длине прессовок, выполненных из порошков воскообразного материала фракции 2,5 мм

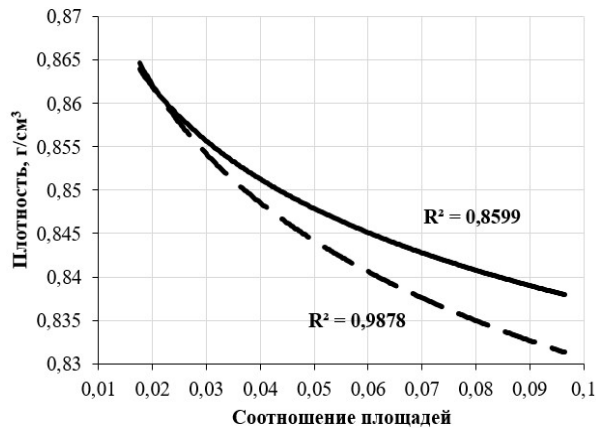


Рис. 11. Экспоненциальные зависимости плотности длинномерных прессовок от отношения площадей поперечных сечений пресс-матрицы и диффузора.

Экспериментально исследовано влияние отношения площадей поперечных сечений диффузора и пресс-матрицы на плотность длинномерной прессовки, получаемой экструзионным формованием. Получены экспоненциальные зависимости плотности от отношения площади поперечных сечений пресс-матрицы и диффузора, изменяющихся в интервале значений от 1/60 до 1/5, представленный на рис. 11.

С увеличением соотношения площадей плотность длинномерной прессовки уменьшается. Установлено, что для формирования бездефектного тонкостенного длинномерного эле-

мента прессовки соотношение площадей поперечных сечений пресс-формы и диффузора для порошка Т1, должно находиться в интервале от 0,025 до 0,1, при пористости менее 5 %.

### Заключение

1. На напряжения, регистрируемые в ходе вертикального одноосного уплотнения воскообразных порошков в закрытой пресс-матрице на пресс-пуансоне тестовой машины, оказывают влияние скорость его перемещения, фракция уплотняемого материала и предусмотренные значения пористости итоговых прессовок. Рост начальных значений пористости образцов, полученных прессованием из воскообразных порошковых материалов, в интервале от 0 до 12 % приводит к уменьшению значений максимальных напряжений, сопровождающих процесс уплотнения на 31,4 – 33,9 % в зависимости от величины фракции порошка. При увеличении размера фракции порошков от 0,63 мм до 2,5 мм значения напряжений увеличиваются в диапазоне 12,9 % – 4,7 % в зависимости от пористости.
2. Наименьшие значения напряжений характерны для прессовок с пористостью от 8% до 12%. Сокращение значений напряжений по завершении процесса прессования, фиксируемых тестовой машиной, достигается в процессе выдержки прессовки под нагрузкой в условиях сомкнутых элементов пресс-матрицы. Снижение величины внутренних напряжений более чем на 90 % происходит: для прессовок с пористостью 0% на 10-й минуте выдержки под нагрузкой; для прессовок с пористостью 12% – на 5-й минуте.
3. Результаты расчетного и экспериментального моделирования процесса снижения значений внутренних напряжений в прессовках направлены на возможность практической реализации прогнозирования напряженно-деформированного состояния элементов пористых выплавляемых моделей, формируемых уплотнением воскообразных порошков в закрытых пресс-матрицах; величину упругого отклика прессовок и их прочность на сжатие.
4. Анализом экспериментальных данных установлено, что технологически обоснованные значения пористости прессовок из воскообразных порошковых материалов достигаются в условиях использования присоединенной массы в процессах уплотнения в поле действия центробежных сил со значениями угловой скорости вращения уплотняемой системы не превышающими 4000 об/мин. При этом прочность на сжатие образцов, полученных таким способом, уступает прочности прессовок, полученных прямым одноосным стесненным сжатием, на 15 %, что является достаточным для реализации задачи их дальнейшего технологического использования.
5. Установлено влияние начальной упаковки частиц воскообразных материалов на величину напряжений, возникающих в процессе уплотнения порошковых тел. На напряжения, необходимые для уплотнения порошковых тел из однокомпонентных воскообразных материалов до требуемых значений пористости преимущественно влияет плотность упаковки таких порошковых тел. При формировании пористых прессовок из двухкомпонентных порошковых сред, на значения напряжений преимущественное влияние оказывает не плотность упаковки, а доля содержания упругих недеформируемых элементов в объеме 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. Экспериментальным моделированием процессов экструзионного формования элементов длинномерной прессовки установлено, что для получения прессовок с минимальным упругим откликом предпочтительно использование конического диффузора при скорости перемещения пресс-пуансона 0,5 мм/с, отношении площадей поперечных сечений пресс-матрицы и диффузора 1 к 25 и отношении высоты насыпки порошковых воскообразных материалов к диаметру пресс-матрицы 3 к 1.
7. Установлено, что для процессов экструзионного формования максимально возможная пористость бездефектных длинномерных прессованных элементов выплавляемых моделей достигается при отношении площадей поперечных сечений внутренней полости пресс-матрицы и диффузора в диапазоне значений от 0,025 до 0,1 и составляет 5 %.

#### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

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

#### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук*

1. 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. – DOI 10.15593/2224-9877/2018.2.04
2. 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. – DOI 10.37972/chgpu.2020.14.82.032
3. 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. – DOI 10.1063/5.0036822.
4. Жилин С.Г. 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. – DOI: 10.37972/chgpu.2022.53.3.004
5. Жилин С.Г. 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. – DOI: 10.52351/00260827\_2022\_08\_83

Zhilin S.G. Influence of packing and parameters of uniaxial compaction of spherical wax elements on stress-strain state of compact / S.G. Zhilin, N.A. Bogdanova, O.N. Komarov // Metallurgist. – 2022. – Vol. 66. – No. 7-8. – P. 970-981. – DOI 10.1007/s11015-022-01409-9

6. Перспективы метода получения удаляемых моделей прессованием воскообразных материалов в поле действия центробежных сил / С.Г. Жилин, Н.А. Богданова, С.В. Фирсов, О.Н. Комаров // *Металлург*. 2023. № 6. С. 75-84. – DOI 10.52351/00260827\_2023\_06\_75  
Prospects of obtaining removable models by pressing wax-like materials under the influence of centrifugal forces / S.G. Zhilin, N.A. Bogdanova, S.V. Firsov, O.N. Komarov // Metallurgist. – 2023. Vol. 67. – No. 5-6. – С. 814-825. – DOI: 10.1007/s11015-023-01567-4
7. Богданова Н.А. Влияние режимов уплотнения воскообразных порошков на напряженно-деформированное состояние прессовок, применяемых в точном литье / Н.А. Богданова, С.Г. Жилин // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2024. Т. 67. № 5. С. 593-603. – DOI 10.17073/0368-0797-2024-5-593-603
8. Идентификация кэп-модели упругопластичности некомпактных сред в условиях сжимающего среднего напряжения / А.А. Адамов, И.Э. Келлер, С.Г. Жилин, Н.А. Богданова // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. – 2024. – № 4. – С. 55-75.  
Identification of the cap model of elastoplasticity of non-compact media under compressive mean stress / Adamov A.A., Keller I.E., Zhilin S.G., Bogdanova N.A. // *Mechanics of Solids*. – 2024. – Vol. 59. – No 4. – P. 1868-1880. – DOI 10.31857/S1026351924040046

#### *Патенты*

9. Пат. 2697995 РФ, МПК В22С 9/04. Способ получения биметаллической отливки / Жилин С. Г., Комаров О. Н., Богданова Н. А.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук. – заявл. 21.11.2018; опубл. 21.08.2019 Бюл. № 24.
10. Пат. 2696118 РФ, МПК В22С 9/04. Способ получения биметаллической отливки / Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук. – заявл. 21.11.2018; опубл. 31.07.2019 Бюл. № 22.
11. Пат. 2757139 РФ, МПК В22С 7/02, В22D 13/00. Способ получения выплавляемой модели тела вращения / Жилин С.Г., Комаров О.Н., Богданова Н.А., Предеин В.В., Стражко Д.А.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук – заявл. 11.03.2021; опубл. 11.10.2021 Бюл. № 29.
12. Пат. 2768661 РФ, МПК В22С 7/02, В22D 13/00. Способ получения выплавляемой модели / Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук. – заявл. 23.11.2021; опубл. 24.03.2022 Бюл. № 9.

#### *Публикации в других изданиях*

13. 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 технологий, технических устройств и конструкций. Материалы докл. III Дальневосточной школы-семинара*. Отв. ред. А.И. Евстигнеев. –2018. –С. 10-12.

14. 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.
15. Жилин С.Г. 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.
16. 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. – DOI 10.17084/20764359-2021-51-73
17. 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.
18. Влияние скорости деформирования порошковых воскообразных сред на прочность прессовок / Н.А. Богданова, С.Г. Жилин, И.Э. Келлер, А.А. Адамов // Вычислительные технологии и прикладная математика. Материалы III научной конференции с международным участием. Комсомольск-на-Амуре, 2024. – С. 64-68.
19. Жилин С.Г. Влияние скорости перемещения пресс-пуансона на напряжения, возникающие при одноосном деформировании воскообразного порошкового тела в закрытой матрице / С.Г. Жилин, Н.А. Богданова, В.В. Предеин // В книге: Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций. Материалы XVIII международной конференции. Екатеринбург, 2024. С. 87.
20. Идентификация кэп-модели упругопластичности некомпактных сред в условиях сжимающего среднего напряжения / А.А. Адамов, И.Э. Келлер, С.Г. Жилин, Н.А. Богданова // В книге: Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XXX Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Москва, 2024. С. 9-11.
21. Формирование пористых выплавляемых моделей тел вращения в поле действия центробежных сил / Н.А. Богданова, С.Г. Жилин, В.В. Предеин, С.В. Фирсов // XXIV Зимняя школа по механике сплошных сред. Тезисы докладов. Пермь. 2025 г.
22. Особенности расчета параметров нагружения порошкового воскообразного тела при его уплотнении в поле действия центробежных сил / С.Г. Жилин, Н.А. Богданова, С.В. Фирсов, В.В. Предеин // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления. Материалы VIII Международной научно-практической конференции. Хабаровск. 2025. С. 112-115.
23. Богданова Н.А. Особенности формирования прессовок из дисперсных воскообразных сред в поле действия центробежных сил / Н.А. Богданова, С.Г. Жилин, В.В. Предеин // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, 2025 г.