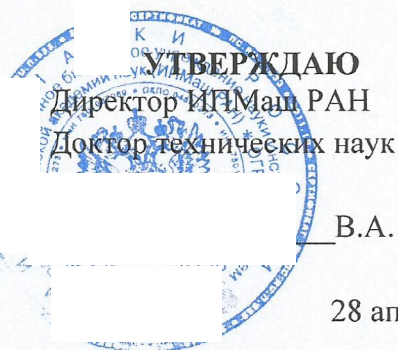


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМаш РАН)



В.О., Большой пр-т, д. 61, Санкт-Петербург, 199178
Тел.: +7 (812) 321-47-78, факс: +7 (812) 321-47-71;
<https://ipme.ru>, e-mail: ipmash@ipme.ru
ОКПО 04850273 ОГРН 1037800003560 ИНН 7801037069 КПП 780101001



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИПМаш РАН
Доктор технических наук

В.А. Полянский

28 апреля 2026

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Богдановой Нины Анатольевны

**«НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРЕССОВОК ИЗ
ВОСКООБРАЗНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по научной специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Актуальность исследования обусловлена необходимостью решения проблемы возникновения напряжений и искажения геометрии в изделиях, формируемых прессованием с участками разной толщины и протяженности. На сегодняшний день регулирование параметров уплотнения и релаксации материала прессовки является ключевым направлением для устранения упругого отклика и расширения номенклатуры точных биметаллических отливок. В связи с этим особую актуальность приобретает использование технологических приемов формирования пористых выплавляемых моделей (ВМ) без внешних источников тепла, что позволяет комплексно решать задачи минимизации литейных дефектов, повышения экологичности производства и снижения финансовых издержек.

Актуальность рецензируемой работы не вызывает сомнений и обусловлена необходимостью решения современной проблемы, возникающей при формировании изделий с участками разной толщины и протяженности: после снятия нагрузки в теле прессовки, возникают напряжения, искажающие её геометрию. Регулирование параметров

уплотнения и релаксации материала прессовки направлено на устранение упругого отклика и расширение номенклатуры точных биметаллических отливок.

Автор предлагает комплексное решение, сочетающее минимизацию литейных дефектов, повышение экологичности производства и снижение финансовых издержек за счёт использования технологических приёмов формирования пористых выплавляемых моделей (ВМ) без внешних источников тепла. Данный способ позволяет:

- получать биметаллические отливки сложной пространственной конфигурации;
- обеспечивать высокую размерно-геометрическую точность моделей при отсутствии типичных дефектов литья (усадка, волнистость, складчатость);
- исключить операцию расплавления модельной композиции перед заливкой, что снижает затраты и улучшает экологические показатели;
- повысить трещиностойкость керамической оболочковой формы за счёт компенсации термического расширения модельного состава порами прессовки.

Кроме того, предложенная технология позволяет изготавливать металлоизделия с необходимыми физико-химическими параметрами поверхности, определяемыми свойствами цветных сплавов, при сохранении прочностных характеристик, соответствующих прочности металлического каркаса. Это ведёт к снижению расхода дорогостоящих цветных сплавов и, как следствие, к уменьшению себестоимости продукции.

Таким образом, тема работы является **актуальной** как в научном, так и в прикладном аспекте, а полученные результаты имеют значение для развития технологии точного литья по выплавляемым моделям и биметаллического литья.

Основной **целью** работы является экспериментальное определение и обоснование таких режимов прессования выплавляемых моделей (включая биметаллические) из порошкового воскообразного материала, которые обеспечивают наименьший уровень внутренних напряжений.

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 формировании прессовок из однокомпонентных воскообразных материалов на требуемое усилие и упругий отклик протяженной прессовки.

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.

Краткое содержание работы

Обоснована актуальность. Показано, что при литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) традиционные способы изготовления моделей (заливкой расплава) приводят к усадке, волнистости, складчатости и разрушающему воздействию на оболочковые формы. Альтернативный метод – прессование порошков воскообразных материалов – исключает теплофизические дефекты, но вызывает проблему внутренних напряжений и упругого отклика, искажающих геометрию прессовок, особенно на участках разной толщины. Сформулированы цель и задачи.

В **главе 1** рассмотрены распространённые модельные составы (на основе парафина, парафино-стеариновые), их достоинства и недостатки. Описаны способы формирования выплавляемых моделей: заливка жидкой композиции, литьё под давлением, запрессовка пастообразного материала. Отмечено положительное влияние пористости на снижение дефектов, но указано, что сведения о процессах формирования прессовок сложной конфигурации (с протяжёнными и тонкостенными элементами) недостаточны. Существующие теоретические модели уплотнения порошков (Бальшин, Жданович) требуют уточнения для воскообразных материалов.

В **главе 2** рассмотрены материалы и методики исследований. Использован порошок парафина марки Т1 двух фракций: 0.63 мм и 2.5 мм. Методики включали:

- одноосное стеснённое сжатие в закрытой пресс-матрице с варьированием скорости (0.5–3 мм/с) и начальной пористости (0–12 %);
- релаксацию напряжений при выдержке под нагрузкой до 15 минут;
- уплотнение в поле центробежных сил (скорость вращения до 15000 об/мин) с присоединённой массой;
- экструзионное формирование длинномерных прессовок через диффузоры разной формы;
- испытания на свободное сжатие для определения прочности.

Для аппроксимации использовались модифицированная формула Ждановича и уравнение Кольрауша.

В **главе 3** изучено напряженно-деформируемое состояние при стеснённом сжатии и центробежном уплотнении. Получены зависимости напряжения от плотности и пористости. Установлено: 1) увеличение начальной пористости с 0 до 12 % снижает максимальные

напряжения уплотнения на 31.4–33.9 %; 2) влияние фракции невелико: при переходе от 0.63 к 2.5 мм напряжения растут на 4.7–12.9 %.

Показано, что выдержка под нагрузкой позволяет снизить внутренние напряжения более чем на 90 %: для пористости 0 % – за 10 минут, для 12 % – за 5 минут. При центробежном уплотнении для достижения пористости 0–10 % требуется скорость вращения 6000–15000 об/мин; применение присоединённой массы снижает её до 3500–4000 об/мин. Прочность образцов, полученных центробежным методом, на 15 % ниже, чем при прямом прессовании, но достаточна для дальнейшего использования.

В главе 4 исследуются формирование слоя на каркасе и экструзионное формование. Рассматриваются схемы начальной упаковки сферических элементов (свободная, тетрагональная, гексагональная, с добавлением упругих недеформируемых элементов). Установлено:

- на напряжения преимущественно влияет плотность упаковки;
- увеличение доли упругих элементов приводит к неравномерности свойств и росту упругого отклика;
- повышение скорости деформирования с 0.5 до 3 мм/с увеличивает напряжения на 28–38 %.

При экструзионном формовании длинномерных прессовок:

- пиковая нагрузка при начале экструзии возрастает с 31 до 37 кН при увеличении скорости с 6 до 36 мм/с;
- замена прямого диффузора на конический снижает нагрузку на 13–31 %;
- упругий отклик для фракции 2.5 мм на 10–20 % выше, чем для 0.63 мм;
- оптимальная скорость пуансона – 0.5 мм/с;
- максимальная пористость бездефектных длинномерных прессовок достигается при отношении площадей сечений матрицы и диффузора в диапазоне 0.025–0.1 и составляет 5 %.

В заключении сформулированы основные выводы из представленной работы.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что на основе проведённых экспериментов выявлены закономерности деформирования порошков воскообразных материалов. Это даёт возможность изготавливать пористые выплавляемые модели (включая модели биметаллических отливок) и их элементы с повышенной точностью размеров и геометрии, при технологически обоснованной пористости и без теплофизических дефектов. Кроме того, полученные результаты предназначены для использования при математическом моделировании и прогнозировании процессов прессования таких материалов.

Научная новизна

Диссертационная работа Богдановой Н.А. обладает высокой **научной новизной**, что подтверждается совокупностью новых экспериментально установленных закономерностей, полученных для ранее малоизученного класса материалов — порошковых воскообразных сред, применяемых в точном литье по выплавляемым моделям. Автором впервые количественно охарактеризовано влияние трёх ключевых факторов (начальной пористости прессовок, величины фракции и скорости деформирования) на напряжённо-

деформированное состояние прессовок, формируемых одноосным стеснённым сжатием. В частности, установлено, что увеличение начальной пористости с 0 до 12 % приводит к снижению максимальных напряжений уплотнения на 31–34 %, а рост фракции порошка с 0,63 до 2,5 мм повышает напряжения на 5–13 % в зависимости от пористости. Экспериментально определено время выдержки образцов в нагруженном состоянии для релаксации созданных напряжений: показано, что снижение внутренних напряжений более чем на 90 % достигается для беспористых прессовок за 10 минут, а для прессовок с пористостью 12 % — уже за 5 минут, что позволяет управлять остаточными напряжениями в изделиях сложной конфигурации. Важным научным результатом является установление степени снижения угловой скорости вращения уплотняемой системы за счёт использования присоединённой массы: для достижения технологически приемлемой пористости (0–10 %) прессовок из воскообразных материалов в поле действия центробежных сил удалось снизить требуемую скорость вращения с 6000–15000 об/мин до 3500–4000 об/мин, что имеет значение для энергоэффективности процесса. Кроме того, в работе впервые определено влияние начальной упаковки воскообразных материалов, выполненных в виде сферических элементов, имитирующих частицы порошков, на напряжённо-деформированное состояние процесса формирования воскообразной поверхности при одноосном стеснённом сжатии. Установлено, что на напряжения преимущественно влияет плотность упаковки, а при наличии упругих недеформируемых элементов определяющим фактором становится их объёмная доля, увеличение которой приводит к неравномерности свойств прессовки и росту упругого отклика. Наконец, экспериментально определено влияние соотношения площадей поперечного сечения цилиндрической пресс-матрицы и диффузора, скорости экструзии и формы диффузора на значения плотности и упругого отклика длинномерных прессовок, моделирующих тонкостенные элементы выплавляемых моделей биметаллических отливок. Показано, что использование конического диффузора позволяет снизить пиковую нагрузку на 13–31 % по сравнению с прямым, а оптимальное отношение площадей сечений находится в диапазоне от 0,025 до 0,1. Таким образом, совокупность полученных автором новых экспериментальных данных, уточняющих и дополняющих классические представления механики порошковых материалов, а также разработка оригинальных экспериментальных методик и технологических схем составляют несомненную научную значимость работы, которая вносит вклад в развитие механики деформируемого твёрдого тела применительно к некомпактным воскообразным средам и создаёт основу для последующего математического моделирования процессов получения прессовок сложной конфигурации.

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки

Результаты диссертационной работы Богдановой Н.А. имеют важное значение для развития механики деформируемого твёрдого тела (в части механики некомпактных порошковых сред), а также для технологии литейного производства и материаловедения. Автором впервые экспериментально установлены количественные закономерности влияния начальной пористости, фракции, скорости деформирования и времени выдержки под нагрузкой на напряжённо-деформированное состояние прессовок из воскообразных порошковых материалов. Показана возможность управления упругим откликом и

остаточными напряжениями, что ранее для данного класса материалов систематически не исследовалось. Разработанные способы центробежного уплотнения с присоединённой массой и экструзионного формования с коническим диффузором расширяют научные представления о формообразовании порошковых тел. Уточнение эмпирической зависимости Ждановича для парафина марки Т1 создаёт основу для совершенствования математических моделей прессования. В целом работа вносит вклад в научное обеспечение технологий получения точных биметаллических отливок методом литья по выплавляемым моделям.

Подтверждение апробации и опубликования основных результатов исследования

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.

Личный вклад в работу автора

Все этапы диссертационной работы, включая постановку цели и задач, выбор материалов и методик экспериментальных исследований, непосредственное проведение экспериментов, обработку, анализ и описание экспериментальных данных, выполнены автором лично. Научные положения и выводы, представленные в работе, получены автором самостоятельно.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Полученные в диссертационной работе Богдановой Н.А. результаты и выводы имеют важное значение для отработки технологически обоснованных режимов формирования выплавляемых моделей из порошкообразного воскообразного материала с целью получения качественных отливок и снижения брака литья, включая такие дефекты, как коробление, слоистость, недоливы, газовые раковины и другие поверхностные и объёмные недостатки.

Разработанные экспериментальные зависимости напряжённо-деформированного состояния прессовок от пористости, фракции, скорости деформирования и времени выдержки под нагрузкой могут быть непосредственно использованы при проектировании технологических процессов прессования порошковых воскообразных композиций в условиях литейных производств, специализирующихся на точном литье по выплавляемым моделям. Предложенные режимы центробежного уплотнения с присоединённой массой, а также экструзионного формования с коническим диффузором позволяют снизить энергозатраты и повысить размерно-геометрическую точность изготавливаемых моделей, что особенно актуально для получения биметаллических отливок сложной пространственной конфигурации.

В качестве рекомендации по дальнейшему развитию темы целесообразно выполнить экспериментальную отливку металла в оболочковые формы, изготовленные по предлагаемым технологиям, с целью определения эффективности разработанных режимов в реальных производственных условиях, включая оценку качества получаемых отливок, уровня брака и экономической целесообразности. Особого внимания заслуживает сравнение результатов, полученных с использованием прессованных пористых выплавляемых моделей, с результатами традиционной технологии литья по выплавляемым моделям, основанной на заливке жидких воскообразных композиций в пресс-формы. Такое сравнение позволит количественно оценить преимущества предложенного подхода с точки зрения точности, чистоты поверхности, экологичности и финансовых издержек.

Перспективы дальнейшей разработки темы, указанные автором в заключении диссертации, включают планируемое исследование напряжённо-деформированного состояния многокомпонентных порошковых тел, что обеспечит расширение номенклатуры прессовок и позволит распространить полученные закономерности на более широкий круг материалов, включая композиции с водорастворимыми добавками и упругими наполнителями. Рекомендуются также продолжить работу по верификации предложенных аналитических зависимостей (включая уточнённую формулу Ждановича и уравнение релаксации Кольрауша) на промышленных партиях изделий, а также адаптировать полученные результаты для использования в системах математического моделирования и прогнозирования процессов прессования порошковых сред.

В качестве **замечаний и вопросов** можно отметить следующее

1. Рисунки 2.5 и 2.6 (стр. 47-48) - схемы прессования в поле действия центробежных сил. В тексте не указаны все обозначения на рисунках (Z , zO , R , ω , направление действия сил). Нет пояснения, почему на рис. 2.6 добавлена присоединённая масса и как именно она взаимодействует с порошком.
2. Рисунок 2.7 (стр. 53) - «Оснастка для испытаний на свободное (а) и стеснённое (б) сжатие». В тексте отсутствует описание конструкции оснастки, материалов, из которых она изготовлена, способа фиксации образца. Не указано, что именно видно на фотографиях.
3. Рисунок 4.7 (стр. 107) - зависимости температуры материала в зоне контакта от скорости экструзии. В тексте указано, что температура плавления не достигается, но не пояснено: 1) почему для фракции 2,5 мм температура растёт быстрее; 2) как именно измерялась температура (термопара показана на рис. 2.11, но нет данных о погрешности); 3) что произойдёт при дальнейшем увеличении скорости (до 50 мм/с и выше)

Заключение

Отзыв составлен, рассмотрен и утвержден на заседании научного семинара Лаборатории экстремальных состояний материалов и конструкций ФГБУН Института проблем машиноведения РАН. Протокол № 3 от 27 апреля 2026 года.


Диссертационная работа Богдановой Нины Анатольевны является законченной научно-квалифицированной работой, весьма актуальной и практически значимой. Новые результаты имеют существенное теоретическое и практическое значение. Полученные результаты в работе являются обоснованными и достоверными. Автореферат отражает содержание диссертации.

Диссертация Богдановой Нины Анатольевны удовлетворяет п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, а ее автор Богданова Нина Анатольевна заслуживает присуждение ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник, зав. Лабораторией
экстремальных состояний материалов и конструкций
Института проблем машиноведения РАН, академик РАН


Петров Ю.В.

Доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
экстремальных состояний материалов и конструкций
Института проблем машиноведения РАН


Селютина Н.С.

Почтовый адрес:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиноведения
Российской Академии Наук (ИПМаш РАН)
Санкт-Петербург, Россия
199178, Васильевский остров, Большой проспект, 61
Тел.: +7-812-321-4778
e-mail: ipmash.ran@gmail.com

