

Институт машиноведения и металлургии
Дальневосточного отделения Российской академии наук
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Хабаровского Федерального исследовательского центра
Дальневосточного отделения Российской академии наук

На правах рукописи

БОГДАНОВА НИНА АНАТОЛЬЕВНА

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРЕССОВОК
ИЗ ВОСКООБРАЗНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Жилин С.Г.

Комсомольск-на-Амуре

2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	15
1.1. Практика формирования изделий повышенной размерной и геометрической точности в ЛВМ	15
1.1.1. Материалы для изготовления ВМ	17
1.1.2. Влияние способа изготовления ВМ на размерно-геометрическую точность литой заготовки.....	21
1.2. Прогнозирование конечных свойств прессовок из порошковых материалов, формируемых без внешних источников тепла.....	25
1.2.1. Способы формирования прессовок из порошков	26
1.2.2. Численное моделирование процессов формования порошковых материалов	29
1.3 Выводы	33
ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПОСТАВЛЕННЫМИ ЗАДАЧАМИ И ПРИМЕНЯЕМЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ...	35
2.1. Постановка экспериментов и объекты исследований, определяющие выбор методик.....	35
2.2. Методы определения свойств воскообразного материала, применяемого для изготовления прессовок, имитирующих выплавляемые и комбинированные литейные модели.....	36
2.3. Методики экспериментального исследования процесса стесненного сжатия воскообразного порошкового материала.....	40
2.4. Методики уплотнения прессовок из порошкового воскообразного модельного материала в поле действия центробежных сил.....	46
2.5. Методики экспериментального определения прочности на сжатие и упругих характеристик прессовок, выполненных из порошкового воскообразного материала.....	51

2.6. Методики проведения экспериментального определения влияния начальной упаковки частиц на процесс деформирования воскообразного порошкового материала в закрытой пресс-матрице.....	54
2.7. Методики получения протяженных прессовок экструзионным формованием воскообразного порошкового материала.....	59
2.8. Выводы	64
ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕССОВОК ИЗ ВОСКООБРАЗНОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧАЕМЫХ СТЕСНЕННЫМ СЖАТИЕМ.....	65
3.1. Условия деформирования порошковых воскообразных материалов для получения прессовок с заданной геометрией и плотностью	65
3.1.1. Зависимость напряжений, необходимых для уплотнения прессовок из воскообразного порошкового материала, от их заданной плотности	65
3.1.2. Влияние времени выдержки уплотненного материала в нагруженном состоянии на релаксацию напряжений прессовок.....	72
3.1.3. Расчетные зависимости релаксации напряжений уплотненного материала от времени выдержки на основе экспоненциального уравнения Кольрауша.....	74
3.2. Особенности уплотнения порошкового воскообразного материала в поле действия центробежных сил.	77
3.3. Влияние условий нагружения воскообразного порошкового материала при его уплотнении, на значения прочности на сжатие получаемых прессовок	80
3.4. Выводы	87
ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ИЗ ВОСКООБРАЗНОГО МОДЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА НА КАРКАСЕ-ОСНОВЕ	89
4.1. Влияние начальной упаковки элементов воскообразного порошкового материала на процесс его деформирования стесненным сжатием	89
4.2. Напряженно-деформированное состояние процессов, сопровождающих экструзионное формование	100

4.2.1. Влияние скорости перемещения пресс-пуансона на значения нагрузок, возникающих в ходе экструзионного формования воскообразных материалов	101
4.2.2. Влияние фракции порошков воскообразных материалов и скорости их экструзии из пресс-матрицы с прямым диффузором на величину упругого отклика длинномерных прессовок	108
4.2.3. Влияние формы диффузора на величину пиковых нагрузок при экструзии порошков воскообразных материалов	111
4.2.4. Влияние фракции порошков воскообразных материалов и скорости их экструзии из пресс-матрицы с коническим диффузором на величину упругого отклика длинномерных прессовок	115
4.2.5. Влияние соотношения площадей поперечных сечений диффузора и пресс-матрицы при экструзии воскообразных порошковых материалов	118
4.3. Выводы	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
ПРИЛОЖЕНИЯ	142

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач современного машиностроения является изготовление металлоизделий с требуемым набором характеристик при сокращении издержек на их производство. Решение этой задачи может заключаться в использовании ресурсосберегающих технологий, уменьшении количества технологических стадий производства, исключении брака на каждой из этих стадий, а также применении технологий, характеризующихся минимальными объемами механической обработки заготовок [1, 2]. Среди способов, позволяющих изготовить металлоизделия сложной пространственной конфигурации с минимальными припусками на механическую обработку, одним из наиболее распространенных является метод литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) [3–5].

Традиционный способ получения металлоизделий методом ЛВМ состоит из следующих технологических этапов:

- изготовление выплавляемых моделей (ВМ) путем заливки жидкого или запрессовкой пастообразного модельного состава, исправление усадочных дефектов, сборка ВМ на модельном блоке (преимущественно припаиванием);

- изготовление оболочковой формы путем послойного нанесения на модельный блок и сушки огнеупорной суспензии;

- удаление ВМ из остывшей оболочковой формы в горячем теплоносителе;

- помещение оболочковых форм в опорный наполнитель, их прокалка;

- заливка жидкого металла в оболочковую форму, его охлаждение;

- удаление элементов литниково-питающей системы, очистка и механическая обработка заготовки.

К достоинствам данного метода можно отнести:

- возможность получения металлоизделий сложной пространственной конфигурации, в том числе тонкостенных;

- высокая размерно-геометрическая точность заготовок (точность размеров таких заготовок может достигать 7 качества);

- высокая чистота поверхности (шероховатость поверхности достигает значений $R_a=1,25$ мкм, в ряде случаев механическая обработка таких деталей не требуется) [3, 6, 7].

Помимо очевидных преимуществ метод ЛВМ, все-же, имеет ряд недостатков. Большое количество технологических операций, широкая номенклатура материалов и высокая трудоемкость делают процесс получения отливки энергозатратным и, следовательно, дорогостоящим. Суммарный брак всех технологических операций в ЛВМ может достигать 10 – 20 % [8–10]. На рисунке 1 представлена схема поэтапного появления дефектов в отливках, получаемых ЛВМ.

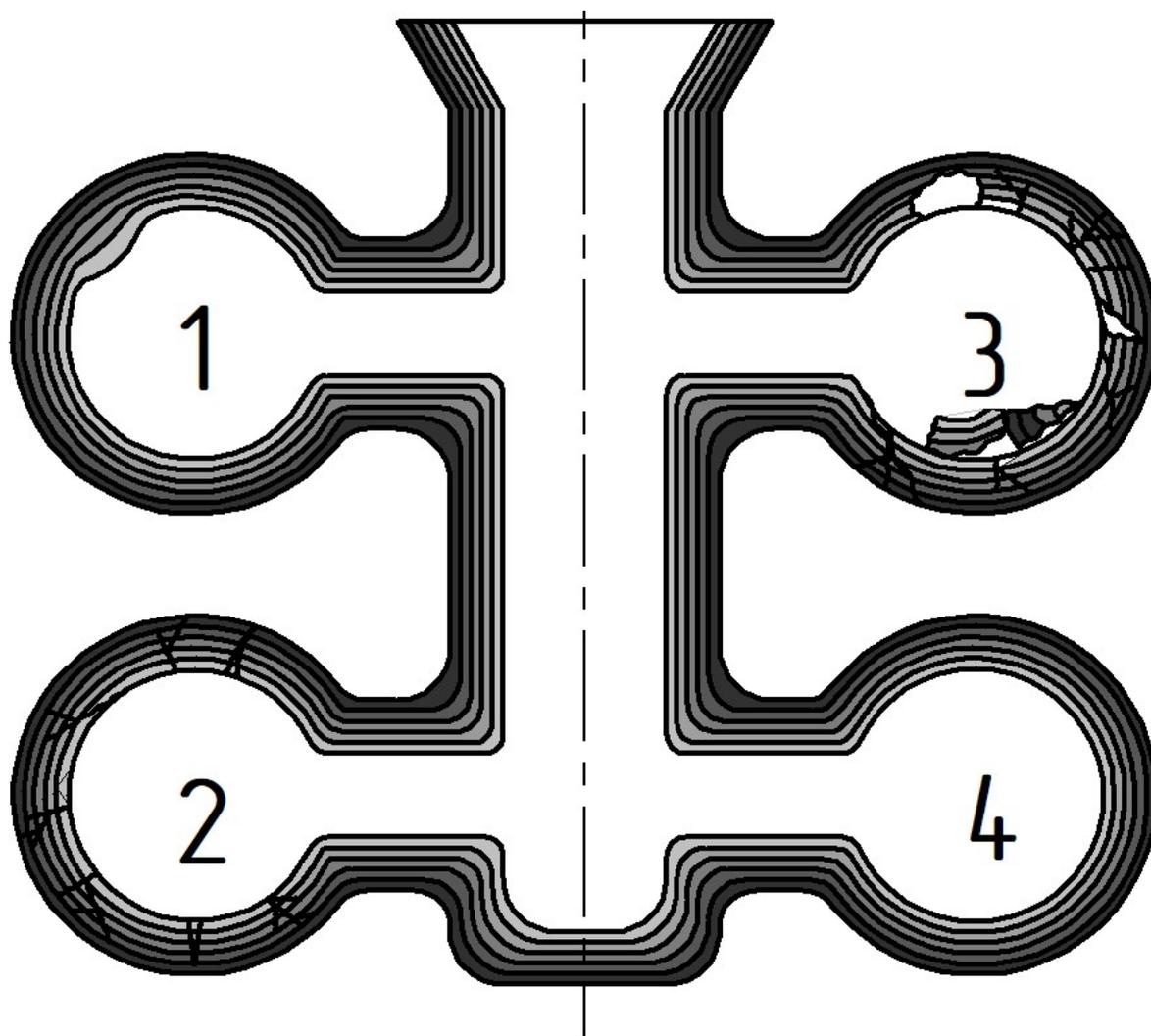


Рисунок 1. Дефекты отливок, получаемых литьем по выплавляемым моделям.

На 1-ом этапе изготовления выплавляемой модели возможно появление таких дефектов, как коробление и усадка материала модели. Глубина усадочной раковины в ряде случаев составляет 8 – 10 % от продольного размера изделия [11]. На 2-ом этапе, когда осуществляется выплавление модельной композиции из оболочковой формы, вследствие действия термического расширения модели, возможно появление трещин в слоях ОФ. Термическое расширение воскообразной модельной композиции может достигать 10 – 14 %. 3 – на этапе прокаливания ОФ из-за расширения модельной композиции в её порах, что приводит к нарушению целостности ОФ, появлению неметаллических включений, пригаров, шероховатости и т.д. на поверхности готовой заготовки [4, 12, 13]. 4 – керамическая оболочковая форма без дефектов.

Снижение риска появления описанных выше дефектов в настоящее время обеспечивается в результате разработки новых технологических приемов на каждом этапе производства литых заготовок. Так для изготовления ВМ применяют новые технологии и материалы с необходимыми реологическими и теплофизическими свойствами, сопровождающими охлаждение и нагрев модельной массы [14–17]. На этапе формирования керамической оболочковой формы применяют технологии её упрочнения, преимущественно за счет армирования или добавления различных наполнителей, формирующих структуру керамики [18, 19].

На комплексное решение проблемы минимизации литейных дефектов, повышения экологичности производства и снижение финансовых издержек направлено использование технологических приемов формирования пористых ВМ [20–22]. Такие модели получают прессованием порошков модельных композиций без внешних источников тепла. Для осуществления данного процесса в пресс-форму засыпают порошок модельной композиции и с помощью пуансона в пресс-форме происходит уплотнение порошкового тела для придания ему необходимой формы и размеров за счет деформирования и оплавления частиц порошкового тела в зонах контакта друг с другом и стенками пресс-формы.

С помощью данной технологии изготовления пористых ВМ также возможно получение биметаллических отливок сложной пространственной конфигурации [23, 24]. Схема процесса получения такой ВМ представлена на рисунке 2.

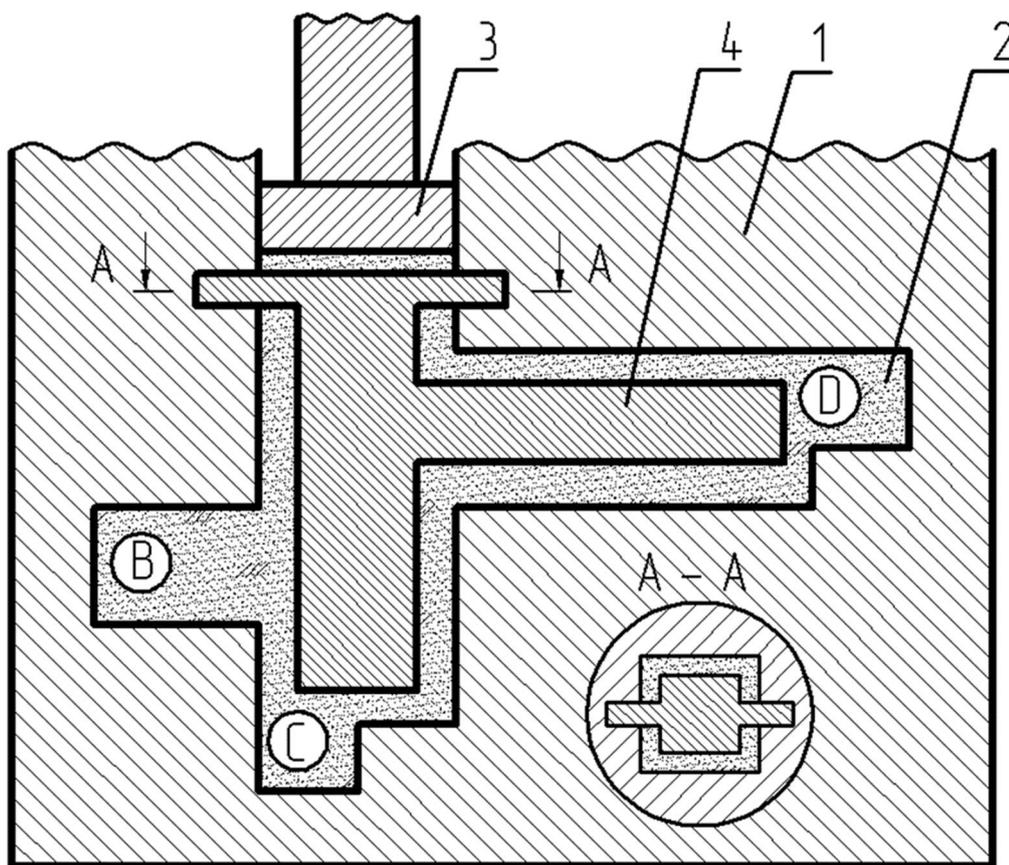


Рисунок 2. Схема осуществления процесса формирования пористой выплавляемой модели произвольной конфигурации прессованием порошков воскообразных модельных составов для получения биметаллической отливки.

В пресс-форме (1), внутренняя полость которой соответствует геометрии выплавляемой модели, напорошкуют порошок воскообразной модельной композиции (2) при помощи пресс-пуансона (3) на жестко закрепленный прочный металлический каркас (4). На готовую ВМ с каркасом внутри наносят неразъемную оболочковую форму, сушат ее. Затем из ОФ выплавляют воскообразную ВМ, ОФ прокалывают и заливают расплавом металла. После кристаллизации и остывания извлекают из оболочковой формы полученную заготовку и подвергают её механиче-

ской обработке. Таким способом можно изготавливать металлоизделия с необходимыми физико-химическими параметрами поверхности, определяемыми свойствами цветных сплавов при том, что прочностные характеристики изделия будут соответствовать прочности каркаса. Таким образом происходит снижение затрат на производство изделий из дорогостоящих цветных сплавов [23, 24].

К основным достоинствам данного способа можно отнести:

- повышение размерно-геометрической точности моделей;
- отсутствие поверхностных дефектов, характерных для моделей, изготовленных литьем (усадка, волнистость, складчатость и т.д.);
- управляемое распределение физико-механических свойств прессовки;
- исключается технологическая операция расплавления модельной композиции перед заливкой в форму, что приводит к снижению затрат и улучшению экологического фактора;
- повышается трещиностойкость керамической оболочковой формы за счет компенсации термического расширения модельного состава порами прессовки.

Несмотря на очевидные преимущества изготовления ВМ запрессовкой модельной композиции, все-же есть ряд факторов, мешающих широкому распространению такого способа в промышленных условиях. Очевидно, что распределение свойств материала по объему прессовки сложной пространственной конфигурации будет неравномерным. Так для прессования области «С» на рисунке 2 потребуется меньше энергозатрат, чем для пропрессовки материала в областях «В» и «D». Физико-механические свойства воскообразных модельных материалов, в частности парафина (один из наиболее распространенных и легкодоступных компонентов модельных составов), мало изучены, следовательно, для математического моделирования и прогнозирования, а также для выработки практических рекомендаций по получению прессовок повышенной точности необходимо дополнительное изучение процессов деформирования такого рода материалов.

Прочность и поверхностная твердость пористой ВМ ниже, чем у изготовленной традиционным способом [21]. Для повышения прочности ранее предложено

вводить в состав воскообразной модельной композиции водорастворимые компоненты в виде гранул, получая, таким образом, пористые комбинированные удаляемые модели (ПКУМ) [21]. В качестве водорастворимых компонентов можно использовать азотные и азотнокислые соли щелочных металлов, гидратированные сернокислые соли, водорастворимые составы на основе карбамида, калиевую селитру и т.д. [3, 21]. При этом процесс удаления модели из оболочковой формы делится на два этапа – керамическую оболочку с ПКУМ внутри опускают в воду для удаления водорастворимых компонентов, а затем выплавляют воскообразную часть модели из ОФ.

Предварительными экспериментальными исследованиями установлено, что упругая релаксация напряжений после снятия нагрузки в направлении поперечном ходу деформирования составляет 0,4 – 0,6 % от размеров полости пресс-формы, в продольном – 0,5 – 1,2 % [25]. Эти значения, несомненно, ниже, чем термическая усадка материала при изготовлении ВМ заливкой жидкой композиции в оболочковые формы, однако задача прогнозирования размерно-геометрической точности прессовки остается нерешенной. Помимо этого, при изготовлении отливок сложной пространственной конфигурации после снятия нагрузки затрудняется прогнозирование структуры и свойств протяженных тонкостенных элементов прессовки, в том числе в зазоре между стенками пресс-формы и металлическим каркасом.

В связи с вышеизложенным целью диссертационной работы является 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.

На защиту выносятся результаты натуральных 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;

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. Согласно полученным экспериментальным данным указано время выдержки образцов в нагруженном состоянии для релаксации созданных напряжений

при прессовании в зависимости от начальной фракции порошкового материала и получаемой пористости;

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 указано 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».

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.

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 применением консолидированного энергетического воздействия» (рег. № 122041900001-0).

Основные результаты исследований и содержание диссертационной работы опубликованы в 23 печатных работах, из них 4 рекомендованы ВАК РФ для публикации основных научных результатов диссертаций, 5 — в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus. Получены 4 патента РФ.

Автор выражает глубокую признательность сотрудникам ИМиМ ДВО РАН за консультационную поддержку, оказанную при выполнении исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы. Отдельную искреннюю благодарность автор выражает члену-корреспонденту Российской академии наук А.А. Буренину, д.т.н., профессору А.И. Евстигнееву, д.ф.-м.н., доценту И.Э. Келлеру, д.ф.-м.н., старшему научному сотруднику А.А. Адамову за интерес и внимание, проявленное к данной диссертационной работе.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Практика формирования изделий повышенной размерной и геометрической точности в ЛВМ

В современных условиях развития машиностроительной отрасли актуальной задачей является разработка и применение новых ресурсосберегающих технологий, позволяющих изготавливать детали машин и механизмов высокой точности, с повышенными эксплуатационными характеристиками, при минимальных затратах на их внедрение [1, 26, 27].

Основными способами получения заготовок точных деталей в машиностроении являются литье, обработка давлением, порошковая металлургия, обработка резанием и различные комбинированные способы [28, 29].

Обработка резанием – способ изготовления и обработки заготовок методом срезания части поверхности материала специальными инструментами на станках с целью получения деталей с заданными формой, размерами и качеством поверхности [30, 31]. К достоинствам данного метода можно отнести высокую размерно-геометрическую точность и качество поверхности изделия, широкую номенклатура способов обработки, материалов и изготавливаемых деталей. К существенным недостаткам обработки резанием относится низкая производительность метода и низкий коэффициент использования материала (КИМ). По причине этих недостатков увеличивается конечная стоимость изделий за счет увеличения продолжительности технологического цикла производства и большого расхода материала, преимущественно в виде стружки. В связи с этим, способ обработки резанием применяется в основном, для финальной обработки заготовок, полученных другими методами обработки материалов. Свести к минимуму влияние недостатков данного способа позволяет изготовление заготовок с характеристиками максимально приближенными к конечным параметрам изделия [32, 33].

Одним из основных способов изготовления заготовок практически неограниченной пространственной конфигурации из значительной номенклатуры металлов

и сплавов является литейное производство [34, 35]. В машиностроении существует несколько основных видов литья. Для производства тонкостенных деталей сложной пространственной конфигурации с высоким качеством поверхности и размерно-геометрической точности часто применяют способ литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) [3, 36–39].

ЛВМ является одним из старейших способов получения металлоизделий. Считается, что первые упоминания о таком методе формирования изделий в Месопотамии относятся к временам бронзового века [40]. Таким способом изготавливались ювелирные украшения, предметы декоративного назначения и примитивные инструменты [35]. Широкое распространение в мировой производственной практике метод ЛВМ получил в 40-х годах прошлого века. К настоящему времени ЛВМ является одним из наиболее приемлемых способов получения точных литых заготовок [41]. Основные сведения об особенностях конструирования литых деталей, процессах формирования выплавляемых моделей и оболочковых форм, номенклатуре сплавов и технологических аспектах производства в РФ были систематизированы Гараниным В.Ф., Ивановым В.Н., Казенновым С.А., Курчманом Б.С., Шкленником Я.И., Озеровым В.А. и др. [3]. Значительный вклад в формирование знаний о процессах, сопровождающих получение точного литья внесли такие зарубежные исследователи, как: Беккерт М., Косняну К., Дитрих В., Свенсон А., Каррунакар Б. и др. [42, 43]. Поскольку ЛВМ является многооперационным и достаточно дорогостоящим процессом, основной задачей на производстве является снижение брака получаемых отливок. Общий брак в ЛВМ может достигать 10 – 20 % [8–10]. От качества поверхности и точности ВМ во многом зависит качество конечной литой заготовки [44]. Так на этапе изготовления ВМ наиболее часто встречаются такие виды брака как коробление, слоистость, недоливы, поверхностные газовые раковины, усадка. Глубина усадочной раковины в ряде случаев составляет 8 – 10 % от продольного размера изделия [11]. Причиной данного ряда дефектов служит несовершенство модельных композиций или технологических аспектов изготовления ВМ.

1.1.1. Материалы для изготовления ВМ

Для производства выплавляемых моделей традиционным способом используется широкая номенклатура материалов, которые должны соответствовать специфическим свойствам [3, 38, 39]:

- для упрощения изготовления ВМ и простоты их удаления из керамической формы модельные композиции должны обладать хорошей текучестью и относительно невысокой температурой плавления;

- высокая способность модельной композиции воспроизводить пространственную конфигурацию внутренней полости пресс-матрицы;

- чем ниже коэффициент усадки модельной композиции, тем ниже склонность к короблению поверхности и выше точность размеров модели, а также уменьшается нагрузка на оболочковую форму при удалении модельного состава, что позволяет предотвратить ее разрушение;

- достаточно высокая прочность и твердость застывшей модельной композиции позволяют избежать механических повреждений при хранении готовых моделей и сборке модельного блока;

- чем ниже длительность затвердевания модельной композиции, тем выше точность размеров и меньше склонность к образованию утяжин и короблению;

- минимальная зольность;

- хорошая смачиваемость огнеупорной суспензией позволяет снизить появление поверхностных дефектов отливки;

- хорошая регенирируемость модельной композиции;

- низкие показатели токсичности и газотворной способности.

Общепризнанной и распространенной является классификация модельных составов, предложенная В. А. Озеровым [3, 33]. К первой, широко применимой в промышленности, группе относятся воскообразные выплавляемые составы. Основными компонентами являются парафин, церезин (натуральный и синтетический), стеарин, буроугольный и торфяной воски, а также натуральные воски (пчелиный,

карнаубский). Для всех модельных композиций, в состав которых входят натуральные компоненты типична нестабильность технологических свойств. Для улучшения свойств в эти составы вводят такие материалы, как касторовое масло, канифоль, этилцеллюлозу, остаток горячего крекинга парафина, различные синтетические полимеры и воски и т.д. [38, 45].

Одним из наиболее распространенных модельных составов из данной категории является ПС 50/50 (сплав, состоящий из 50 % парафина и 50 % стеарина). Достоинствами данной модельной композиции являются: легкость в изготовлении; невысокая температура плавления; высокая пластичность. К недостаткам можно отнести низкую прочность при изготовлении тонкостенных элементов, значительную усадку, низкую скорость затвердевания и омыление стеарина в процессе выплавки модели [39].

Для исключения вышеперечисленных недостатков были разработаны бесстеариновые модельные составы, например, МВС-3Т (парафин – 45 %, церезин – 40 %, полиэтиленовый воск – 15 %). Такие модельные составы обладают более высокой прочностью, трещиностойкостью и теплоустойчивостью. Основным недостатком является высокая термическая усадка. Устранение данного недостатка возможно воздухововлечением в количестве от 20 % до 50 % от общего объема модельной массы [39, 46].

Еще одной категорией модельных составов, пользующихся популярностью, являются модельные композиции на основе минеральных восков природного происхождения, например, модельный состав ВИАМ-102 (парафин – 25 %, буроугольный воск – 35 %, торфяной воск – 35 %, триэтанолламин – 5 %). Достоинствами данных составов являются достаточно высокая твердость, текучесть и теплопроводность.

Модельные составы на основе парафина, церезина, полиэтиленового и буроугольного восков с добавлением 5 % - 10 % канифоли, относящиеся к типам ЗГВ-101, ЗГВ-102 и т.д., производимые, например, на ОАО «Завод горного воска» (республика Белоруссия), обладают высокой пластичностью, широким температурным

интервалом пастообразного состояния. Но основным недостатком таких модельных составов на основе природных компонентов является нестабильность физико-химических свойств и высокий коэффициент объемного расширения, в некоторых случаях он достигает 10 % [47, 48], следовательно у таких моделей значительная линейная и объемная усадка.

Ко второй группе относятся составы на основе синтетических и натуральных смол с добавлением воскообразных модельных материалов. Эти составы отличаются более высокой, по сравнению с первой группой, теплоустойчивостью и прочностью.

Широко распространенным модельным составом на основе природных смол является, КПсЦ (канифоль сосновая – 50 %, церезин – 20 %, полистирол – 30 %). Данные модельные составы обладают высокой теплоустойчивостью и не склонны к короблению, но являются хрупкими, склонны к трещинообразованию и высокой усадке [3, 39].

Модельные композиции на основе термополимерной смолы, например, марок «Салют-1», «Салют-3» и т.д., разработанные ФГУП ВИАМ и изготовленные ФГУП "Московское машиностроительное производственное предприятие "Салют", обладают низкой усадкой и зольностью, высокой прочностью и трещиностойкостью [49, 50].

Все модельные составы на основе синтетических и натуральных смол также характеризуются рядом существенных недостатков – высокая температура плавления, плохая смачиваемость суспензией [3, 50]. Для улучшения свойств таких модельных композиций применяется ряд примесей, например, таких как барит [51], поливинилбутиловый эфир [52], нефтеполимерная смола [49], терефталевая кислота [53] и т.д.

Третья группа включает в себя водорастворимые составы на основе карбамида, азотных и азотнокислых солей щелочных металлов, гидратированных сернокислых солей (например, КББк 98-2, КБНк 90-10 и т.д.). Эти составы теплоустойчивы, имеют линейную усадку в 2 – 5 раз меньше, чем воскообразные составы. К

недостаткам относится сравнительно высокая температура плавления, непригодность повторного использования, хрупкость. Применяются такие составы в основном для изготовления сложных поднутрений и каналов внутри модели [3, 38].

Термопласты (например, полистирол вспенивающийся, монолитный полистирол). Применяются для литья по выжигаемым моделям, имеют достаточную прочность при малой плотности, теплоустойчивы. Но при уменьшении объемной массы модели снижается точность размеров и повышается шероховатость поверхности [3, 39].

Легкоплавкие металлы и сплавы (амальгамы ртути, ртуть, сплавы на основе висмута и т.д.). Эти составы применяются крайне редко в связи с высокой токсичностью паров, высокой стоимости и сложности способа изготовления [3, 39].

Для снижения усадки и повышения прочности, формоустойчивости и точности моделей применяют комбинированные модельные композиции с твердыми наполнителями. Как правило в качестве основы берутся воскообразные композиции, в состав которых вводятся порошки тугоплавких восков и синтетических смол, водорастворимые компоненты, фталевые кислоты [50]. Известны модельные составы, в которые вводятся порошки графита и наноалмазные частицы [54, 55]. Также известны комбинированные пенополистироловые модели с облицовочным слоем из модельной композиции [56].

В настоящее время в мире распространены такие модельные составы как: Romocast (фирма «Romonta», Германия), Remet GTS и Remet GTW (фирма «Remet», Англия), Blayson A7-FRD /15/T и Blayson A7-LMP/215/M (фирма «BlaysonOlefines», Англия) и т.д. Такие составы изготовлены на основе синтетических восков, очищенных гидрокарбонатных восков, смол с добавлением твердого наполнителя. Детальный состав таких композиций, отличающихся относительно высокой стоимостью, широко не афишируется и является, по всей видимости, предметом коммерческой тайны представленных выше производителей [39, 57, 58]. Достоинством данных модельных составов является достаточно низкий коэффициент термического расширения. Но, ввиду высокой вязкости в жидком состоянии, данные модельные составы являются практически нерегенерируемыми.

1.1.2. Влияние способа изготовления ВМ на размерно-геометрическую точность литой заготовки

На качество конечного изделия в ЛВМ также влияет способ изготовления ВМ. Традиционно этап изготовления ВМ включает в себя следующие технологические операции: подготовка модельной композиции; подготовка пресс-матрицы; заполнение пресс-матрицы модельной композицией; выдержка для застывания и охлаждения ВМ; извлечение модели; по необходимости сборка модельного блока [46, 59].

В современном машиностроении заполнение пресс-матрицы в основном происходит свободной заливкой жидкой композиции, заливкой жидкой модельной композиции под давлением или запрессовкой пастообразной модельной композиции.

Как правило, для заливки жидкого модельного состава используют воскообразные модельные композиции, т.к. они обладают низкой вязкостью при температуре заливки [39]. Самый простой способ изготовления ВМ заключается в свободной заливке жидкого модельного состава в пресс-матрицу. Таким способом, как правило, изготавливают тонкостенные или пустотелые модели, ввиду высокого риска образования утяжин и усадочных дефектов. В процессе заполнения пресс-матрицы возможно вспенивание модельного состава и образование пузырьков воздуха в объеме выплавляемой модели. Для предотвращения этого дефекта в некоторых случаях применяют свободную заливку модельного состава с вакуумированием [39]. Чтобы убрать усадочную раковину, после заполнения пресс-матрицы жидким модельным составом в некоторых случаях применяют допрессовку при небольших давлениях прессования [39, 60].

На современных машиностроительных предприятиях широко распространён способ изготовления выплавляемых моделей путем запрессовки пастообразного модельного состава. Выплавляемые модели, изготовленные таким способом, имеют более качественную поверхность и более точны по размерам относительно

моделей, полученных заливкой жидкой модельной композиции. Для реализации данного способа существует множество разнообразных устройств, выбор которых зависит от конфигурации выплавляемой модели, применяемой модельной композиции и серийности производства [3, 39, 61]. Для мелкосерийного производства или единичного выпуска продукции, как правило применяют ручные шприцы или пневматические, винтовые и т.д. прессы. Для крупносерийного и массового производства применяются автоматические установки для изготовления выплавляемых моделей [3, 39, 62].

В настоящее время все большую популярность набирает способ изготовления ВМ с помощью аддитивных технологий. Таким образом литейные модели могут быть изготовлены из порошкового полистирола или фотополимерных композиций. Выплавляемые модели изготавливают по MJM-технологии из воскообразного модельного состава с добавлением специального фотополимера на акриловой основе. Отверждение модели происходит под воздействием ультрафиолетовой лампы. Выжигаемые модели изготавливают из полиметилметакрилата по Ink-Jet-технологии и фотополимеров по SLS-технологии [63, 64].

К недостаткам аддитивных технологий при применении в литейной промышленности можно отнести [65–68]:

- сложность получения материалов для изготовления модели и их высокая стоимость;
- применимость только в единичном или мелкосерийном производстве;
- неудовлетворительное качество поверхности модели (как правило, необходима последующая механическая обработка);
- при больших объемах производства высокая стоимость изготовления, ввиду энергетических и временных затрат;
- размер детали зависит от модели 3D-принтера и ограничивается размерами области построения.

У всех вышеперечисленных способов имеется существенный недостаток – термическое расширение модельной композиции. Таким образом, для получения отливки высокой размерной и геометрической точности перед конструированием

пресс-матрицы для изготовления выплавляемой модели необходимо проводить численный расчет припусков, компенсирующих расширение модельного состава и для улучшения качества поверхности проводить механическую обработку готовой выплавляемой модели. Отмеченное выше, существенно удорожает процесс получения изделий в ЛВМ. Также расширение модельного состава на этапе удаления выплавляемой модели из оболочковой формы может достигать 10 %, что приводит к появлению сколов и трещин КОФ, а на поверхности готовой заготовки появляются неметаллические включения, пригары, шероховатость и т.д. [4, 12, 13]. Таким образом, для уменьшения количества таких видов брака при производстве отливок методом ЛВМ в настоящее время приоритетным направлением исследований является повышение трещиностойкости КОФ.

Основными компонентами изготовления КОФ являются огнеупорный формовочный материал, жидкое связующее и растворитель.

Наиболее широкое распространение среди формовочных материалов получили тугоплавкие окислы металлов. В качестве связующих в основном выступают материалы на основе кремнийорганических соединений. Самое широкое распространение в металлургии имеют связующие на основе этилсиликата [38, 39, 69]. Так как сам этилсиликат не обладает вяжущими свойствами, необходимо проводить процедуру гидролиза, что существенно усложняет процесс изготовления КОФ. Поэтому существует множество исследований направленных на поиск альтернативных материалов. Например, в некоторых работах предложено использовать жидкое стекло. К недостаткам этого связующего относится низкая температура плавления и образование на внутренней стенке оболочки пригара из-за химического взаимодействия компонентов [39, 70]. Существуют комбинированные КОФ, в которых первые несколько слоев сделаны на этилсиликатном связующем, а последующие на жидкостекольном [39, 71]. Также в качестве связующего используют кремнезоли (коллоидные растворы кремнезема), они дают хорошее качество внутренней поверхности, однако прочность таких ОФ достаточно низкая [38, 72].

В качестве растворителей используется ацетон, этиловый и изопропиловый спирты или эфирыальдегидная фракция [38, 39]. Для регулирования свойств КОФ

в состав вводят различные добавки. Известны составы, где с целью повышения газопроницаемости и прочности КОФ добавляется пенообразователь [73, 74], поверхностно-активные вещества (ПАВы) [75], различные полимерные добавки [39, 61]. С этой же целью предложены способы армирования КОФ нейлоновыми волокнами, стекловолокном, волокнистым графитом и т.д. [60, 61, 76]

В традиционной технологии ЛВМ существует два варианта получения КОФ: с опорным наполнителем или без него. Наличие опорного наполнителя позволяет уменьшить число слоев оболочки, увеличить её жесткость, прочность и устойчивость во время заливки и прокаливании [38, 39, 46]. В качестве сыпучего опорного наполнителя обычно выступает бой оболочковых форм, шамот, кварцевый песок [3, 38, 39]. В состав опорного наполнителя может добавляться связующее, как правило, это жидкое стекло, гидравлические вяжущие и т.д.

Для комплексного решения проблемы дефектообразования, увеличения размерно-геометрической точности отливки и предотвращения разрушения КОФ на протяжении ряда лет разрабатывается технология изготовления ВМ холодной запрессовкой порошка модельной композиции в пресс-матрицы [38, 39, 77]. Дальневосточным исследователям Жилину С.Г., Комарову О.Н., Сапченко И.Г., Евстигнееву А.И. и др. удалось выяснить, что создаваемая по объему прессовки пористость до 12 %, во время удаления ВМ из пресс-матрицы компенсирует термическое расширение модельного состава и положительно влияет на теплоустойчивость. Разработаны способы формирования прессовок из порошковых воскообразных материалов и общие принципы проектирования пресс-оснастки. Для повышения прочности и поверхностной твердости таких ВМ предложено введение в состав воскообразной модельной композиции водорастворимых компонентов в виде гранул, таким образом получая пористые комбинированные удаляемые модели (ПКУМ) [21]. Выявлено, что точность таких моделей и чистота поверхности выше, чем у изготовленных традиционными способами, так как отсутствуют дефекты, связанные с нагревом воскообразной модельной композиции. Однако, в настоящее время широкого распространения в машиностроении данный способ изготовления ВМ не

нашел в связи с затруднениями прогнозирования распределения напряжений в изделиях со сложной пространственной конфигурацией, где участки прессовки отличаются по протяженности и толщине. Экспериментально установлено, что упругое последствие материала после снятия нагрузки в направлении продольном ходу деформации составляет 0,5 – 1,2 %, а в поперечном – 0,4 – 0,6 % от размеров полости пресс-матрицы [25]. Безусловно такие отклонения значительно меньше, чем значение усадки у выплавляемых моделей, полученных традиционными способами, однако для получения прецизионного литья требуются дополнительные исследования и поиски вариантов устранения данной проблемы.

1.2. Прогнозирование конечных свойств прессовок из порошковых материалов, формируемых без внешних источников тепла

Существенная часть производственных процессов, характерных для машиностроительной области приходится на обработку материалов давлением. Данный способ позволяет получать заготовки с заданными формой и размерами путем пластической деформации [36, 78]. К достоинствам этого метода можно отнести высокий КИМ, высокое качество заготовок, высокую производительность, но применим способ только к материалам, обладающим достаточной пластичностью для процесса деформирования.

Основной задачей изучения технологий обработки давлением порошковых материалов является прогнозирование повторяемости структуры и физико-механических свойств конечной прессовки в условиях серийного производства. Стабильность свойств таких заготовок зависит от размера пор и равномерности их распространения по объему уплотняемого тела [79–81]. В свою очередь последнее зависит от условий прессования – начальной упаковки частиц порошка, скорости деформирования, температуры при которой происходит процесс и т.д. [82, 83].

1.2.1. Способы формирования прессовок из порошков

Для производства изделий специфической формы и назначения часто используют порошковые технологии. С помощью таких технологий можно получить изделия из материалов с уникальными свойствами, которые невозможно или затруднительно получить другим путем [79, 80, 84–87].

К основным достоинствам порошковых технологий можно отнести:

- возможность получать изделия с высокой размерно-геометрической точностью, что приводит к снижению затрат на механическую обработку изделия;
- получение изделий с уникальными свойствами и регулируемой пористостью;
- высокий КИМ (в некоторых случаях достигает 0,97);

К недостаткам относится:

- нестабильность физико-механических свойств изделия;
- упругое последействие материала после снятия нагрузки;
- сложность изготовления крупногабаритной продукции.

Классический способ изготовления изделий из порошковых материалов состоит из следующих технологических этапов [88, 89]:

1. Изготовление порошка.
2. Подготовка порошковой смеси.
3. Формовка.
4. Спекание (если необходимо).
5. Дополнительная механическая обработка изделий.

Первая стадия является самой трудоемкой и энергозатратной. Несомненно, самым большим классом материалов, применяемых в порошковой технологии являются порошки конструкционных металлов на основе железных порошков, далее изделия на основе цветных металлов, полимеров и огнеупоров [84, 90, 91].

Порошки изготавливают двумя основными способами:

1. Физико-механический. При данном методе измельчение материала в порошок происходит без нарушения химического состава способом дробления и размола или распылением и грануляцией.

2. Химико-металлургический.

Готовый порошок, в зависимости от требуемого размера частиц, разделяется по фракциям с помощью ситового способа или методом воздушной сепарации.

На следующем этапе производства происходит подготовка порошковой шихты. Для формирования необходимых физико-механических свойств готового изделия важно, чтобы частицы материала равномерно распределились по всему объему шихты.

Одним из основных этапов производства изделий способом порошковых технологий является формование. Целью формования является уплотнение дозированного количества готовой шихты в пресс-матрице для придания необходимых физико-механических свойств, размеров и конфигурации готового изделия. Наиболее применяемыми в машиностроении являются способы формовки путем холодного и горячего прессования в закрытых пресс-матрицах, экструзионного формования и прокатки. Также в настоящее время большую популярность набирает способ производства изделий с помощью аддитивных технологий [47, 82, 85, 91–93].

Формовка изделий способом холодного прессования в закрытой пресс-матрице является наиболее простым и широко распространенным методом и осуществляется следующим образом: готовая шихта размещается в прочной пресс-матрице (как правило, стальной) и уплотняется на прессовых агрегатах гидравлического, механического или пневматического способов действия. Процесс прессования заключается в уменьшении первоначального объема засыпки, формирования определенных размерно-геометрических параметров и физико-механических свойств изделия за счет деформирования элементов шихты [94]. В результате поверхность уплотненного изделия приобретает конфигурацию формообразующей поверхности пресс-матрицы. При формовке изделий сложной пространственной конфигурации для обеспечения равномерно распределенной пористости и однородности физико-механических свойств по всему объему прессовки, необходимо

прилагать различные нагрузки для её отдельных частей, для этого используют пресс-матрицы с несколькими пресс-пуансонами [95, 96].

К достоинствам данного способа относятся: достаточно высокая размерно-геометрическая точность готового изделия, простота реализации процесса прессования и возможность получения композитных изделий с новыми физико-механическими свойствами [92, 97, 98]. Однако, при извлечении прессовки из формы, вследствие изменения напряженно-деформированного состояния, происходит упругий отклик материала, величина которого зависит от многих факторов – давления прессования, скорости перемещения пресс-пуансона, теплофизических условий процесса и т.д. [99–101].

Разрабатываемые отечественными и зарубежными учеными методы сокращения значений упругого отклика материала при холодном прессовании сводятся, преимущественно, к выбору скорости его деформирования и времени выдержки в нагруженном состоянии, что позволяет производить релаксацию напряжений до момента извлечения прессовки [82, 83, 97].

Для изготовления длинномерных изделий равномерной плотности, например, труб, уголков, швеллеров и т.д. применяется процесс мундштучного прессования, заключающийся в экструзии порошкового материала сквозь диффузор в пресс-матрице [95, 96, 102–104]. На производстве для реализации мундштучного прессования применяются различные гидравлические прессы шнекового, дискового и т.д. типов, с вертикальным или горизонтальным расположением. Больше распространение получили горизонтальные гидравлические прессы ввиду большей производительности, неограниченности длины прессовки и возможности изготовления изделий с большой поперечной площадью. В то время как вертикальные прессы, как правило, применяются для изготовления профилей с малой площадью поперечного сечения ограниченной длины [105].

Значительное влияние на качество изделия, получаемого экструзией, оказывают реологические свойства прессуемого порошкового материала, усилия прессо-

вания и скорость перемещения пресс-пуансона. При неподходящих условиях прессования возможно появление дефектов: неравномерности внутренней структуры прессовки, усадка, коробление, задиры и т.д. [104, 105].

При применении технологий обработки давлением материалов на производстве для снижения издержек на проектирование пресс-оснастки и прогнозирования структуры и физико-механических свойств конечной прессовки при изменении условий прессования целесообразно использование методов численного моделирования.

1.2.2. Численное моделирование процессов формования порошковых материалов

Первые теоретические исследования процесса деформирования порошковых тел были посвящены получению эмпирических зависимостей плотности прессовки от величины усилия деформирования [90, 106]. Уравнения теории прессования порошковых материалов, основанные на теории дискретных сред появились в конце 40-х – 60-х годах прошлого века [107, 108]. Первое уравнение прессования керамических порошковых материалов было получено в 1947 году А.С. Бережным [107]. В 1948 году М. Ю. Бальшиным было получено уравнение прессования для металлических порошковых материалов [84]. Его исследования легли в основу современной дискретно-контактной теории прессования порошковых материалов. В последствии зарубежными и отечественными учеными получено множество эмпирических зависимостей плотности порошкового тела от усилия деформирования [82, 83, 100].

Еще одним отечественным исследователем, внесшим значительный вклад в развитие дискретно-контактной теории прессования порошковых материалов является Г.М. Жданович [100]. В его монографии [100] приводится подробный анализ существующих на тот момент уравнений прессования и приводится полученный исследователем ряд эмпирических зависимостей уплотнения порошковых материалов.

В рамках дискретно-контактной теории деформация в порошковом теле рассматривается как деформация и взаимодействие отдельных частиц этого тела. Как правило, для моделирования процесса уплотнения порошковых материалов применяются идеализированные элементы в сферическом виде, взаимодействие между которыми описывается через контактное давление и трение за счет взаимного перемещения элементов относительно друг друга [101, 109, 110]. Таким образом, на структуру и физико-механические свойства получаемой прессовки значительное влияние оказывают насыпная плотность, гранулометрический состав и усилие прессования.

Также существенное влияние на деформационные процессы в порошковом теле оказывает начальная упаковка компонентов порошкового материала. Так как в рамках дискретно-контактной теории прессования нагрузка между элементами порошкового материала передается через контакты между этими элементами, одним из основных параметров, влияющих на энерго-силовые характеристики процесса прессования является среднее число контактов отдельных элементов между собой (координационное число) [101, 110, 111]. Самыми часто используемыми и простыми вариантами идеализированного расположения сферических элементов порошкового материала в процессе моделирования являются гексагональная и кубическая упаковки этих элементов, координационные числа которых равны 8 и 6 соответственно. Чем больше плотность упаковки частиц порошка, тем выше координационное число [101, 112, 113]. В реальных порошковых телах с беспорядочной структурой упаковки частиц вычисляется среднее координационное число в зависимости от плотности засыпки.

Так как дискретно-контактная теория прессования порошковых материалов основана на исследовании взаимодействия отдельных элементов материала, это не позволяет точно оценить распределение пористости в прессовках сложной пространственной конфигурации и адекватно описать весь процесс деформирования [108]. Ввиду того, что при переходе от описания контактного деформирования отдельно взятых элементов к деформации всей порошковой заготовки принимается

множество допущений и обобщений, для конкретизации которых необходимо проводить отдельные экспериментальные исследования. Этот факт и развитие теории пластичности способствовали в 70-х годах прошлого века появлению континуальных теорий прессования порошковых материалов [90, 108]. Согласно данным теориям деформация рассматривается полностью для всего объема порошкового тела как некая осредненная совокупность локальных объемов со специфическими упругими и пластическими свойствами [90, 101, 114–116]. Это позволяет исследовать прохождение фронта уплотнения, прогнозировать конечные значения пористости, объем и конфигурацию прессовки [101, 117, 118].

Современный этап развития машиностроения характеризуется появлением множества новых неконструкционных материалов, для применения которых в производственных условиях необходимо предварительное численное моделирование процессов, сопровождающих формоизменение порошкового материала, необходимое для выбора наиболее подходящих условий и режимов формирования прессовки.

На данном этапе развития порошковой технологии существует большое количество эмпирических уравнений прессования, устанавливающих зависимость плотности прессовки от давления прессования. Экспериментальным и математическим моделированием процессов обработки давлением порошковых материалов занимались такие отечественные и зарубежные исследователи как: А.С. Бережной, М. Ю. Бальшин, Г.М. Жданович, В.Н. Анциферов, М.Б. Штерн, В.Н. Цеменко, В.Е. Перельман, С.С. Кипарисов, А.С. Ventham, В.С. Hancock и др. [84, 91, 100, 106, 108, 119, 120]. Связано это с тем, что каждое уравнение получено путем обработки с помощью подходящей расчетной модели определенных экспериментальных данных, полученных для конкретных материалов и условий прессования [84, 92, 121]. Классификация расчетных моделей гранулированных сред представлена в работе Р.В. Гольдштейна и С.В. Кузнецова [122]. Как правило эмпирические уравнения логарифмического, степенного или экспоненциального вида с постоянными и переменными коэффициентами [83, 92, 121, 123].

Получить обобщенный закон деформирования, соответствующий различным порошковым материалам, схемам и усилиям прессования, несмотря, на множество попыток, так и не удалось [108]. Полученные аналитическим путем уравнения прессования не имеют широкого применения на производстве, так как получены они с помощью сложного математического аппарата с применением множества допущений, имеют низкую достоверность и описывают процесс деформирования в качественных характеристиках [100, 119, 121, 124]. Для получения количественных характеристик процесса деформирования порошковых материалов в производственных условиях применяют компьютерное моделирование с помощью разнообразных программных комплексов.

Компьютерное моделирование формоизменения порошковых материалов является сложным процессом, имеющим ряд особенностей, поэтому существует несколько подходов к решению таких задач. Как правило, для компьютерного моделирования процессов прессования порошковых материалов используют программное обеспечение, основанное на методе конечных элементов, это такие программные комплексы как ANSYS, Q-FORM, DEFORM, ABAQUS и т.д. и методе дискретных элементов, программные комплексы – MercuryDPM, Yade [125]. Для моделирования напряженно-деформированного состояния сыпучих, неоднородных или порошковых материалов в процессе формования в программные комплексы встроены различные расчетные модели. Выбор таких моделей во многом зависит от реологических свойств материала и условий деформирования. Наиболее часто применимы расчетные модели Друкера-Прагера, Кэм-клей модель, модель Гурсо-Твергарда-Нидельмана, кэп-модель Димаджио-Сэндлера и т.д.[126–128]

С помощью метода конечных элементов можно рассчитать напряженно-деформированное состояние тел со сложной пространственной конфигурацией и неоднородной структурой [129–131]. К преимуществам данного метода можно отнести достаточную простоту определения напряжений, деформаций и перемещений элементов порошкового тела как в линейной, так и в нелинейной постановке, широкий выбор математических моделей для расчета и форм конечных элементов, что

позволяет рассчитывать напряженно-деформированное состояние для тел со сложной пространственной конфигурацией. Недостатками метода конечных элементов является недостаточно высокая точность расчетов порошковых тел, ввиду зависимости результата от выбора формы элементов и расположения конечно-элементной сетки, а также применимость способа для расчета малых деформаций [120, 130, 132].

Для исследования деформационных процессов в порошковых материалах в последнее время широко применяется метод дискретных элементов [125, 133, 134]. Впервые данный метод был применен П. Канделлом и О. Стрэком в 1979 году для исследования деформирования горных пород [135]. Метод дискретных элементов дает возможность численно рассчитать местоположение, скорость и взаимодействие частиц гранулированного или слабосвязанного материала с учетом больших деформаций. Однако, ввиду того, что напряженно-деформированное состояние отдельно взятой частицы не всегда совпадает с напряженно-деформированным состоянием всего объема неоднородного тела, для применения данного численного метода необходима калибровка на реальном материале [133, 136].

1.3 Выводы

1. Для получения литых заготовок высокой точности наиболее часто применим способ литья по выплавляемым моделям. Но ввиду широкой номенклатуры материалов и большого количества технологических операций брак может составлять до 30%. Комплексно решить проблему дефектообразования позволяет способ изготовления выплавляемых моделей без термического воздействия на модельную композицию, т.е. запрессовкой порошка воскообразного модельного материала, что позволяет решить проблему усадки и нарушения геометрии поверхности.

2. Самый часто применяемый на производстве способ деформирования порошковых материалов – прессование в закрытой пресс-матрице. Таким образом можно получить заготовки сложной пространственной конфигурации без применения дополнительных технологических операций.

3. Существует множество теоретических способов расчета напряженно-деформированного состояния порошковых материалов, однако единой системы оценки для всех материалов и способов нагружения не получено. А для применения существующих методов необходимо проведение натурного эксперимента.

ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПОСТАВЛЕННЫМИ ЗАДАЧАМИ И ПРИМЕНЯЕМЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

При проведении экспериментальных исследований в работе использовались, преимущественно, известные методики [3] а также специально разработанные методики, оборудование и оснастка позволяющие исключить недостатки известных ранее методик. Обработка полученных экспериментальных данных осуществлялась при помощи пакетов прикладных программ «Microsoft Excel», «Mathcad» и «Wolfram Mathematica». Физические величины, использованные в работе, приведены к единицам Международной системы СИ или применяемым наравне с ними [138].

2.1. Постановка экспериментов и объекты исследований, определяющие выбор методик

Достижение поставленной цели и задач исследований осуществлялось на следующих этапах:

- определение технологически обоснованных режимов уплотнения воскообразных порошковых материалов и их влияние на равномерность распределения свойств прессовок, а также на величину внутренних напряжений в материале при различных способах одноосного стесненного сжатия в пресс-матрице, в том числе в поле действия центробежных сил;

- влияние параметров изготовления прессовок из порошков воскообразных материалов на разрушение при свободном сжатии получаемых образцов;

- влияние скорости перемещения пресс-пуансона и начального расположения компонентов прессовок, формируемых из воскообразных и комбинированных материалов (с недеформируемыми элементами, имитирующими порообразующие компоненты модельных материалов) на напряженно-деформированное состояние процесса стесненного сжатия;

- определение условий формирования длинномерной прессовки из воскообразного порошка с минимальным значением упругого отклика путем рационального выбора фракционного состава материалов и скорости его экструдирования без внешнего подведения тепла;

- исследование влияния соотношения площадей внутреннего поперечного сечения пресс-матрицы и диффузора на силовые параметры процесса экструзии и плотность, получаемой длинномерной прессовки.

Начальный этап работы включает экспериментальное исследование поведения воскообразного порошкового материала на стадии структурной деформации внутри пресс-матрицы. А именно, исследование начального расположения компонентов внутри пресс-матрицы и параметров деформирования, при которых достигается минимальное отклонение линейных размеров прессовки от внутреннего размера пресс-матрицы.

Следующим этапом исследования стало определение влияния параметров деформирования (скорости деформирования, размера фракций материала) на силовые параметры процесса получения длинномерной прессовки холодным экструзионным формованием.

Заключительным этапом исследования стало определение влияния соотношения площадей внутреннего поперечного диаметра пресс-матрицы и диффузора на силовые параметры процесса деформирования и требуемую плотность длинномерной прессовки.

2.2. Методы определения свойств воскообразного материала, применяемого для изготовления прессовок, имитирующих выплавляемые и комбинированные литейные модели

Для изготовления пористых выплавляемых и комбинированных моделей используют, как правило, воскообразные материалы на основе парафина с добавками, такими как стеарин, церезин и т.д. [3, 50, 139]. Связано это с тем, что использование

парафина как самостоятельного материала для изготовления выплавляемых моделей классическим способом, несмотря на его очевидные преимущества – достаточную прочность, широкую доступность, низкую стоимость, технологически нецелесообразно, ввиду его большой усадки по сравнению с, например, парафиностеариновой смесью. Исследование объемной усадки сплавов на основе воскообразного материала парафин марки Т1 проводилось следующим образом: расплав воскообразной модельной композиции с содержанием парафина Т1 и стеарина в диапазоне значений по массе от 0 до 100 %, нагретый до температуры плавления 60 °С, заливали до верхней кромки в колбу объемом 60 см³ (рисунок 2.1,а); после застывания модельной композиции и её охлаждения до нормальной температуры 20 °С, колбу опускали в тарированный сосуд с водой и по вытесненному объему воды определяли объемную усадку модельной композиции.

На рисунке 2.2 представлена зависимость величины объемной усадки воскообразной модельной композиции от процентного содержания парафина и стеарина в смеси в диапазоне от 0 до 100%.

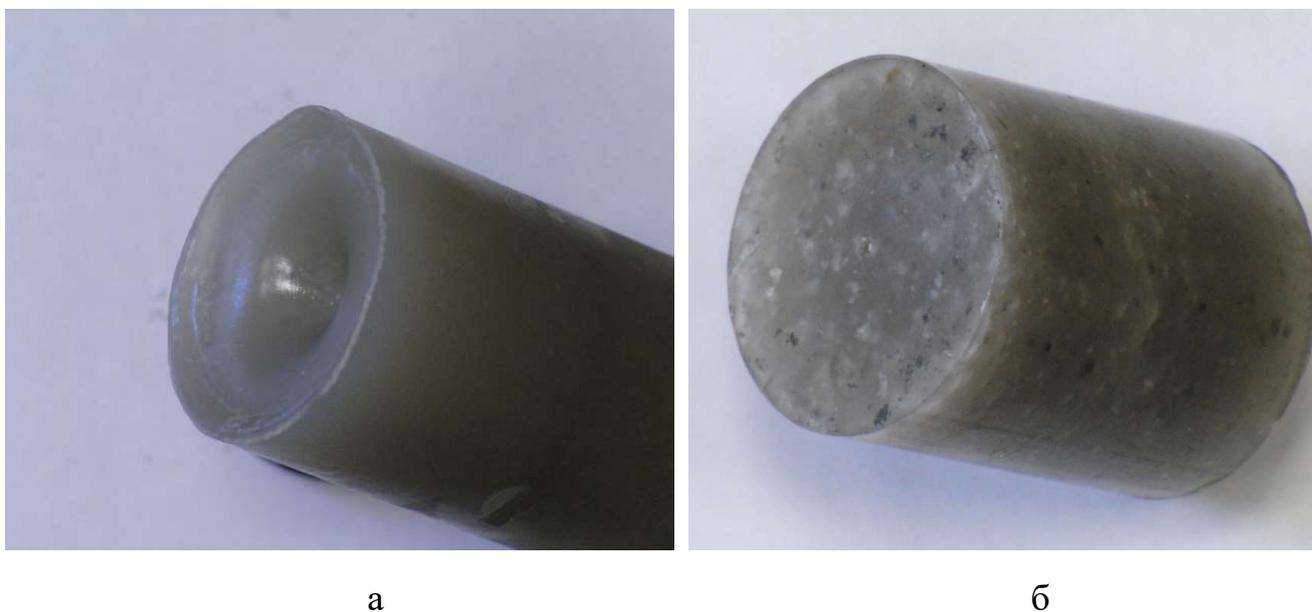


Рисунок 2.1. Внешний вид выплавляемых моделей: а – изготовлена заливкой жидкого расплава в форму; б – изготовлена прессованием воскообразной модельной композиции.

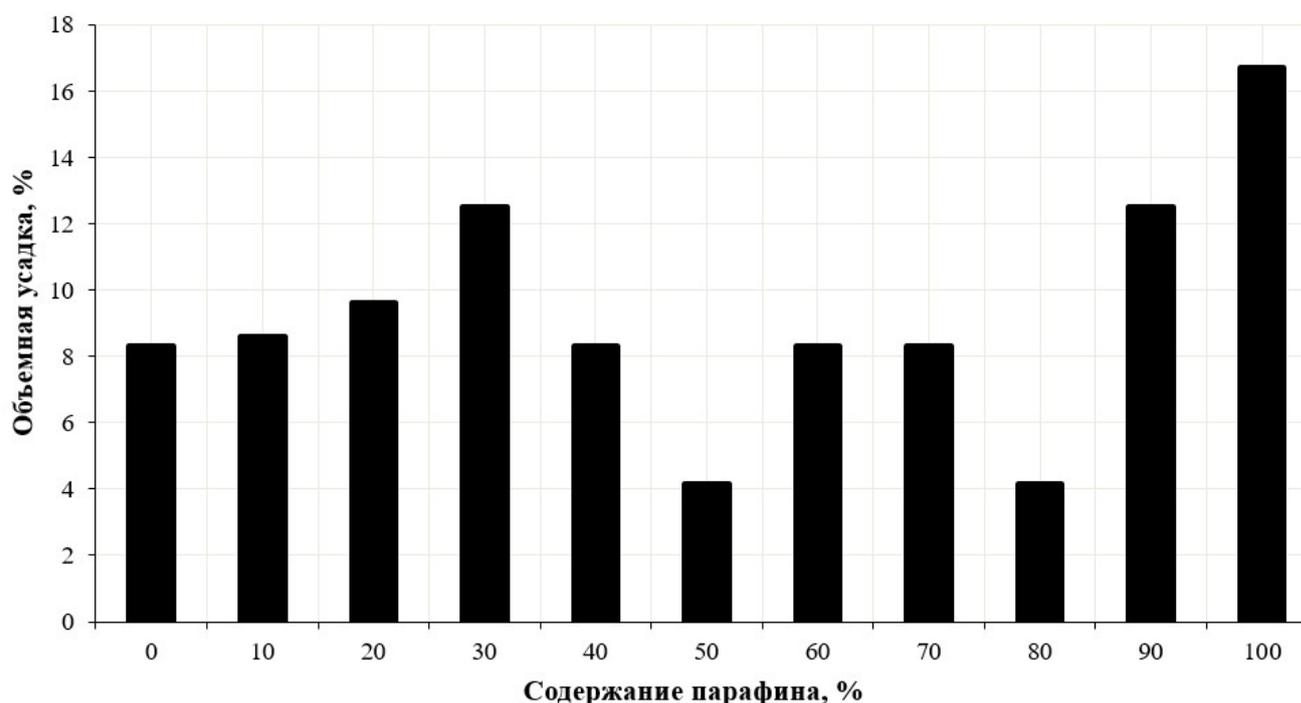


Рисунок 2.2. Объемная усадка воскообразной модельной композиции.

Из рисунка 2.2 видно, что наименьшая объемная усадка (около 4 %) соответствует парафиностеариновой смеси с содержанием парафина и стеарина в равных частях (ПС 50/50) и с содержанием парафина 80 % (ПС 80/20). Наибольшее значение объемной усадки (более 16 %) соответствует парафину марки Т1 без примесей. Однако, при использовании парафина марки Т1 в качестве модельного материала для изготовления пористых выплавляемых моделей способом прессования порошка, величина объемной усадки не имеет значения, внешний вид модели представлен на рисунке 2.1,б. Предварительными экспериментами установлено, что величина упругого отклика материала пористой выплавляемой модели не превышает 0,7 – 1,2 % в направлении продольном приложении нагрузки и 0,4 – 0,5 % в поперечном направлении приложения нагрузки [21]. Формирование выплавляемых моделей из дорогостоящих модельных композиций во многом определяет конечную стоимость литых изделий. Поскольку принцип формирования пористых прессованных моделей не предполагает появления поверхностных и усадочных дефектов, то

целесообразность использования порошкового воскообразного материала марки Т1 в качестве однокомпонентного модельного состава становится очевидной.

Для получения более точных экспериментальных данных использовали чистый технический парафин марки Т1, свойства которого позволяют отнести его к первой классификационной группе [3, 140]. К физико-механическим свойствам материала, определяющим процесс уплотнения, можно отнести плотность свободной заливки и температуру плавления. Температура плавления определялась в ходе нагрева воскообразного модельного материала со скоростью 2 °С/мин с помощью прибора дифференциально-термического анализа Shimadzu DTG-60H и составляет 60 °С. Для определения плотности изготавливали цилиндрические образцы объемом 200 см³ заливкой жидкого воскообразного модельного материала в формы. Массу каждого образца измеряли на лабораторных весах с точностью измерения 0,1г. Затем по формуле $\rho=m/V$ рассчитывали плотность парафина марки Т1 при свободной заливке, которая составила 860 кг/м³.



а

б

Рисунок 2.3. Внешний вид фракций парафина марки Т1. а – фракция 0,63 мм;
б – фракция 2,5 мм.

В ходе предварительных экспериментов выявлено, что технологически приемлемым диапазоном фракций воскообразного модельного материала является диапазон 0,63 – 2,5 мм (рисунок 2.3) [22]. Применение фракции менее 0,63 мм нецелесообразно ввиду склонности материала к комкованию. Применение фракции парафина Т1 более 2,5 мм не обеспечивает формирование тонкостенных участков прессовок сложной пространственной конфигурации. Частицы воскообразного модельного материала имеют преимущественно неправильную хлопьевидную форму, ввиду ее получения рассевом стружки парафина марки Т1 на ситах модели 026.[141]

2.3. Методики экспериментального исследования процесса стесненного сжатия воскообразного порошкового материала

Для определения значений напряжений, необходимых для уплотнения порошка воскообразного материала в закрытой пресс-матрице проводилось экспериментальное исследование стесненного сжатия. Для этого эксперимента на рабочий стол универсальной испытательной машины «AG-X plus Shimadzu» устанавливали стальную цилиндрическую пресс-матрицу с диаметром основания $d = 44$ мм, заполненную порошком воскообразного материала марки Т1 (рисунок 2.4,а). Для устранения арок и равномерного распределения по объему пресс-матрицы компонентов порошка воскообразного материала, последний подвергали утряске в течение 5 минут с частотой 3,5 Гц (рисунок 2.4,б). Предварительными экспериментами установлено, что после 5 минут утряски плотность порошкового тела Π_{0i} не изменяется [12]. Полученная высота порошкового тела h_{0i} , представляет собой линию начала перемещения траверсы (рисунок 2.4,в). Начальная высота h_{0i} порошкового тела зависит от массы засыпки m_i .

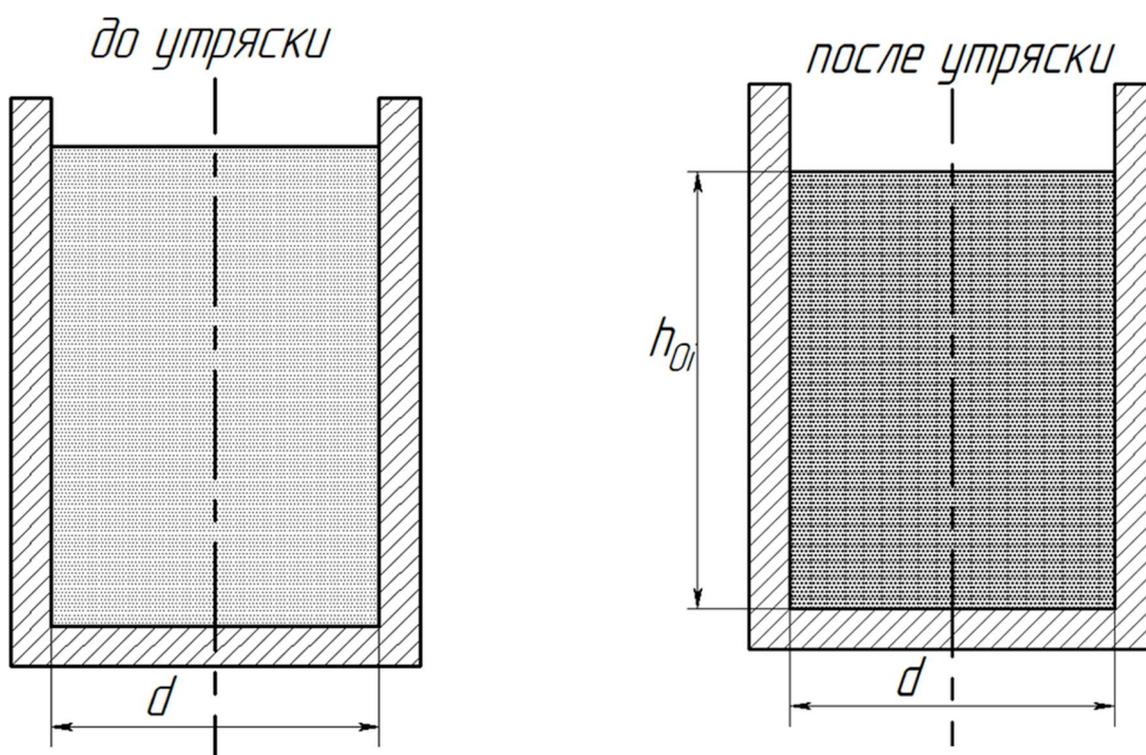
Массы образцов m_i определяем из выражения (2.1) [4, 12]:

$$m_i = V \rho_i = \frac{\pi d^2}{4} h \cdot \rho_{\text{лит}} \left(1 - \frac{\Pi_{Hi}}{100\%} \right) = \frac{\pi d^2}{4} h \cdot \rho_{\text{max}} (1 - \Pi_i) \quad (2.1)$$

где V – конечный объем прессовки, см^3 ; ρ_i – плотность прессовки, $\text{г}/\text{см}^3$; $\rho_{\text{лит}}$ – плотность материала в литом состоянии, $\text{г}/\text{см}^3$; P_{Hi} – параметр «недопрессовки», определяющий значение экспериментальной пористости, выражаемый в % и показывающий, на сколько плотность ρ_i прессовки меньше, чем $\rho_{\text{лит}}$ образца того же объема; ρ_{max} – максимальное значение плотности материала марки Т1.

Для определения максимальной плотности ρ_{max} воскообразного материала изготавливали цилиндрические образцы заливкой его расплава в формы. Затем образцы извлекали и в течении 10 часов подвергали их компрессионному сжатию на универсальной испытательной машине «AG-X plus Shimadzu». Таким образом, для воскообразного материала марки Т1 максимальная плотность составила $\rho_{\text{max}} = 890 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Для исследования процесса уплотнения пористых порошковых тел в закрытой пресс-матрице, последовательность которого представлена на рисунке 2.4, пресс-пуансон с высоты h_{0i} перемещали до высоты $h = d$, получая пористые прессовки плотностью ρ_i на $0 \div 12$ % меньшей, чем плотность материала Т1 определенная для состояния свободной заливки (рисунок 2.4,в). При этом пористость порошкового тела составляет P_i .



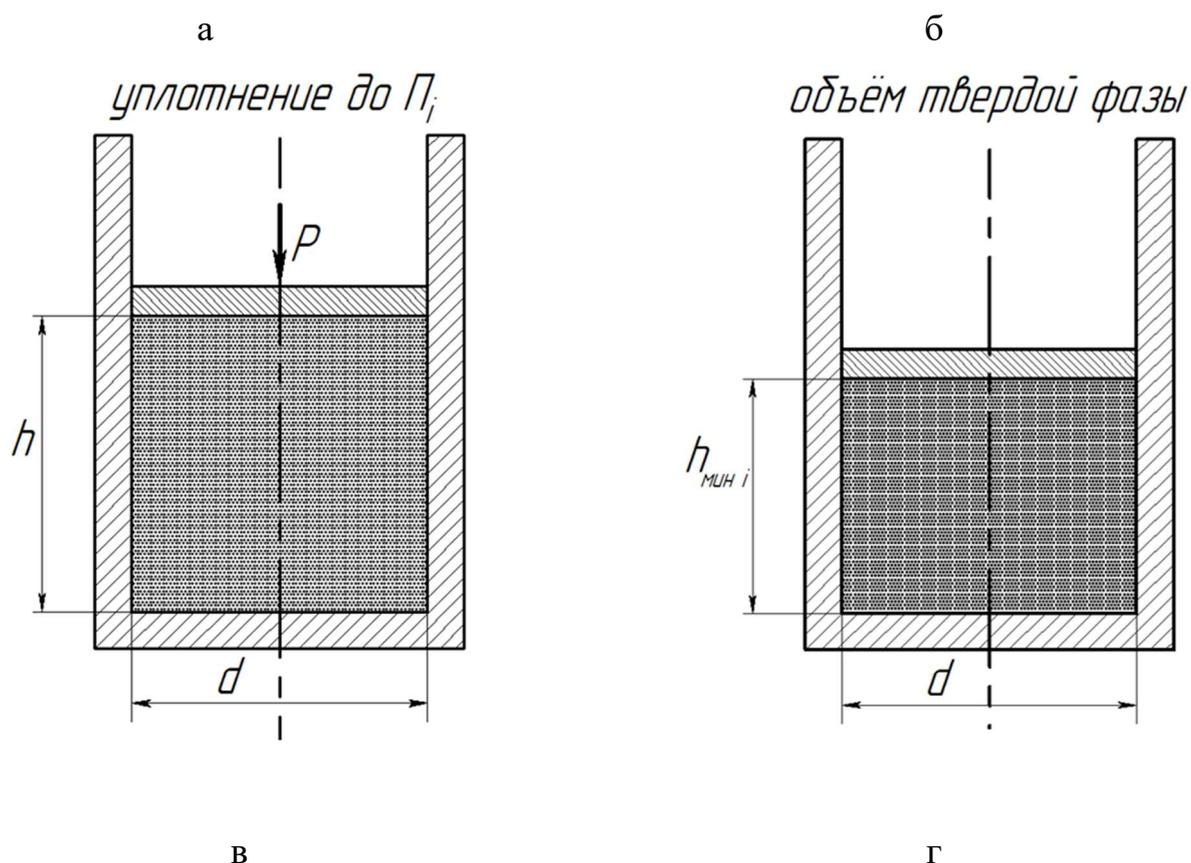


Рисунок 2.4 Последовательность процесса уплотнения пористых порошковых тел

Пористость образца Π_i определяли из выражения (2.2):

$$\Pi_i = 1 - \frac{\rho_{лит} (1 - \Pi_{Hi} / 100\%)}{\rho_{max}} \quad (2.2)$$

В таблице 2.1 представлены экспериментальные данные в зависимости от параметра недопрессовки Π_{Hi} (значение которого принадлежит интервалу $0\% \leq \Pi_{Hi} \leq 12\%$), для прессовок полученных из фракций 0,63 мм и 2,5 мм материала марки Т1, их массы m_i соответствовали параметру недопрессовки. Для эксперимента выбран шаг значений Π_{Hi} , составляющий 2%.

В методе испытаний тестовой машины «AG-X plus Shimadzu» скорость перемещения траверсы задавалась так, что уменьшение значений пористости Π_i изменялось на равную величину за единицу времени. Таким образом, каждому значению h_{0i} , соответствовало значение пористости Π_{0i} , при этом снижение пористости Π_i до 0 происходило за время $t = 60$ сек. Расчетная высота $h_{мин i}$ для

каждой навески порошкового материала, соответствует условию, когда его плотность составляет ρ_{max} , а значит $\Pi_i = 0$. Масса навески воскообразного порошкового материала определялась из выражения (2.3):

$$h_{мини} = \frac{m_i}{\rho_{max} \cdot S} \quad (2.3)$$

где S – площадь основания цилиндра формообразующей полости.

Скорость перемещения траверсы тестовой машины при уплотнении навески порошка модельного материала вычислялась из условия (2.4):

$$v_i = \frac{h_{0i} - h_{мини}}{t} = \frac{\Delta h_i}{t} \quad (2.4)$$

где Δh_i – перемещение траверсы с h_{0i} до $h_{мини}$, мм.

Для релаксации напряжений и равномерного распределения плотности по всему объему уплотненного порошкового тела, при достижении пресс-пуансоном положения, при котором высота прессовки h равна d , в течении 60 минут образцы выдерживались в нагруженном состоянии.

Таблица 2.1. Параметры процесса получения прессовок

Параметр	Фракция, мм	$\Pi_{Hi}, \%$	
		0	12
h_{0i} , мм	0,63	103,0	89,0
	2,5	116,2	103,1
Π_{0i}	0,63	0,57	0,57
	2,5	0,63	0,63
Δh_i , мм	0,63	58,7	44,7
	2,5	71,8	58,8
v_i , мм/МИН	0,63	59,68	50,02
	2,5	72,78	65,01
m_i , Г	0,63/2,5	57,5	50,6

Результатом серии экспериментов являются графические зависимости напряжений, возникающих на траверсе тестовой машины при сжатии порошкового тела и напряжений разгрузки при релаксации материала от времени его выдержки под нагрузкой.

Величина упругого отклика прессовки O_{II} определялась из выражения (2.5):

$$O_{II} = \frac{(d_{II} - d)}{d_{II}} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

где O_{II} – величина упругого отклика прессовки, %; d и d_{II} – внутренний диаметр пресс-матрицы и внешний диаметр прессовки соответственно, полученные при помощи регистратора DIN863 Vogel с точностью измерения 0,001 мм.

Устранение упругого отклика материала получаемых прессовок возможно путем релаксации напряжений, за счет перехода упругих деформаций в вязкопластические. В свою очередь релаксация напряжений зависит от напряжения необходимого для уплотнения образца и времени выдержки образца под постоянной нагрузкой. Для определения кривых зависимостей напряжений от времени процесса релаксации материала, после стесненного сжатия образца, т.е. при достижении пресс-пуансоном положения, при котором высота прессовки h равна d , в течении 60 минут образцы выдерживались в нагруженном состоянии.

Зависимость между деформацией образца ε , действующими напряжениями σ , и временем τ , может быть определена реологическим уравнением состояния материала (2.6) [11, 12]:

$$f(\sigma, \varepsilon, \tau) = 0 \quad (2.6)$$

Для аппроксимации экспериментальных данных процесса релаксации напряжений, возникающих на траверсе универсальной испытательной машины в ходе процесса деформирования, использовалась двухпараметрическая зависимость Кольрауша в виде (2.7) [12, 13].

$$\sigma_i = \sigma_0(I_i) \cdot \exp\left[-(t/\tau)^k\right], \quad (2.7)$$

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

Параметры τ и k регрессионной зависимости определяли с помощью метода наименьших квадратов, применяя его к экспоненциальной функции (2.10). Для перехода к относительным величинам необходимо обозначить через $\tilde{\sigma}_i$ экспериментальное значение напряжения в момент времени t_i , отнесенное к $\sigma_0(\Pi_i)$: $\tilde{\sigma}_i = \sigma(t_i) / \sigma_0(\Pi_i)$. Напряжения $\tilde{\sigma}_i$ принадлежат диапазону значений $0 < \tilde{\sigma}_i \leq 1$, следовательно, $\ln \tilde{\sigma}_i \leq 0$. Показатель рассеяния определяем из выражения (2.8):

$$Q = \sum_{i=1}^n \left(\ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) - \ln \left(-\ln \left(\exp^{-\left(t_i/\tau\right)^k} \right) \right) \right)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) - k \cdot \ln(t_i / \tau) \right)^2 \quad (2.8)$$

В момент начала разгрузки при времени $t = 0$, относительное напряжение составляет $\tilde{\sigma}_i = 1$, следовательно, выражение (2.8) не может существовать. При выборе экспериментальных точек в регрессионном анализе это учитывается.

Вычислив частные производные Q по τ и k и приравняв их к нулю получаем систему уравнений (2.9):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial \tau} &= 2 \sum_{i=1}^n \left(\ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) - k \cdot \ln(t_i / \tau) \right) \cdot \frac{k}{\tau} = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial k} &= -2 \sum_{i=1}^n \left(\ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) - k \cdot \ln(t_i / \tau) \right) \cdot \ln \left(\frac{t_i}{\tau} \right) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Для получения стандартной формы нормальных уравнений систему (2.9) преобразуем к виду (2.10):

$$\left. \begin{aligned} k \cdot \ln \frac{1}{\tau} \cdot n + k \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i &= \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i), \\ k \cdot \ln \frac{1}{\tau} \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i + k \cdot \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 &= \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i. \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Решаем систему уравнений (2.10) и получаем:

$$k \cdot \ln \frac{1}{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \cdot \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2},$$

$$k = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2}. \quad (2.11)$$

Для τ запишем следующее выражение:

$$\tau = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \cdot \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \ln t_i - \sum_{i=1}^n \ln(-\ln \tilde{\sigma}_i) \cdot \sum_{i=1}^n \ln t_i} \right). \quad (2.12)$$

Для численного определения параметров k и τ в уравнении релаксации (2.7), в выражения (2.11) и (2.12) необходимо подставить данные, полученные в ходе натурального эксперимента.

2.4. Методики уплотнения прессовок из порошкового воскообразного модельного материала в поле действия центробежных сил

Уплотнение порошков воскообразных материалов в поле действия центробежных сил позволяет получать выплавляемую модель, выполненную в виде тел вращения, конфигурация внешней поверхности которой задается вращающейся пресс-матрицей. Центробежные силы, в данном случае, обеспечивают одинаковые значения нагрузки в слоях уплотняемого материала, расположенных в направлении от центра вращения к его периферии, что, в конечном итоге, обеспечивает равномерное распределение свойств в уплотненном теле, а именно, одинаковые значения плотности в каждой точке расположенной на одинаковом удалении от центра вращения [142]. Актуальность исследований в обозначенном направлении продиктована необходимостью поиска энергоэффективного варианта формирования прессовок тел вращения, обеспечивающего снижение скорости вращения пресс-матрицы при обеспечении технологически приемлемых значений прочности получаемых прессовок.

Схема реализации процесса уплотнения в поле действия центробежных сил представлена на рисунке 2.5 [143]. В пресс-матрицу 1, выполненную в виде стакана

радиусом R засыпают порошок воскообразной модельной композиции. На рисунке 1, а пресс-матрица находится в состоянии покоя и через держатель 2 прикреплена к ротору центробежной машины. В настоящей работе использовалась лабораторная настольная центрифуга «MLW - T23D» с максимальной угловой скоростью до 7000 об/мин [144]. На рисунке 2.5, б представлена схема получения пористых выплавляемых моделей в поле действия центробежных сил в момент вращения пресс-матрицы, где: Z – расстояние от ротора центрифуги до дна пресс-матрицы (в настоящей работе $Z = 15$ см); z_0 – расстояние от ротора центрифуги до поверхности уплотняемого тела в момент начала вращения пресс-матрицы.

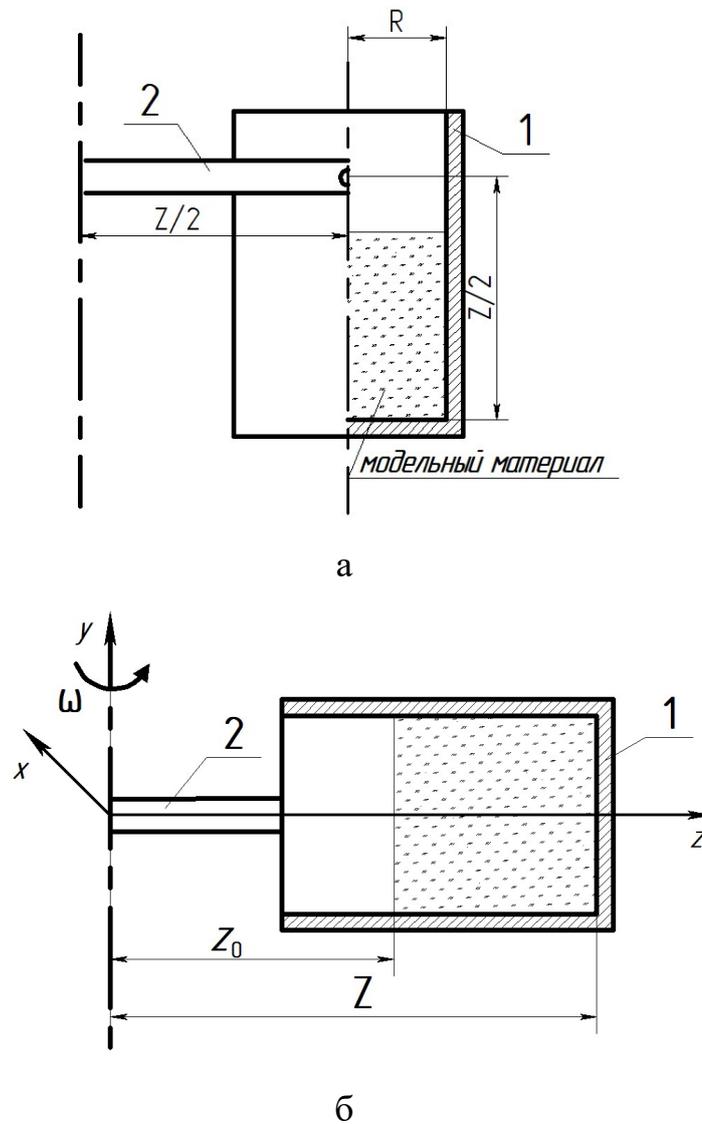


Рисунок 2.5. Схема прессования пористой выплавляемой модели, выполненной из воскообразного порошкового материала в поле действия центробежных сил.

Предварительными экспериментами установлено, что для получения прессовки с заданным интервалом пористости скорость вращения ротора центрифуги должна составлять от 6000 до 15000 об/мин [142, 143]. В связи с тем, что обеспечение такой скорости энергозатратно и требует специализированного оборудования, которое не всегда доступно в производственных условиях, процесс получения выплавляемых моделей тел вращения необходимо осуществлять в два этапа с помощью дополнительного силового воздействия [142, 145].

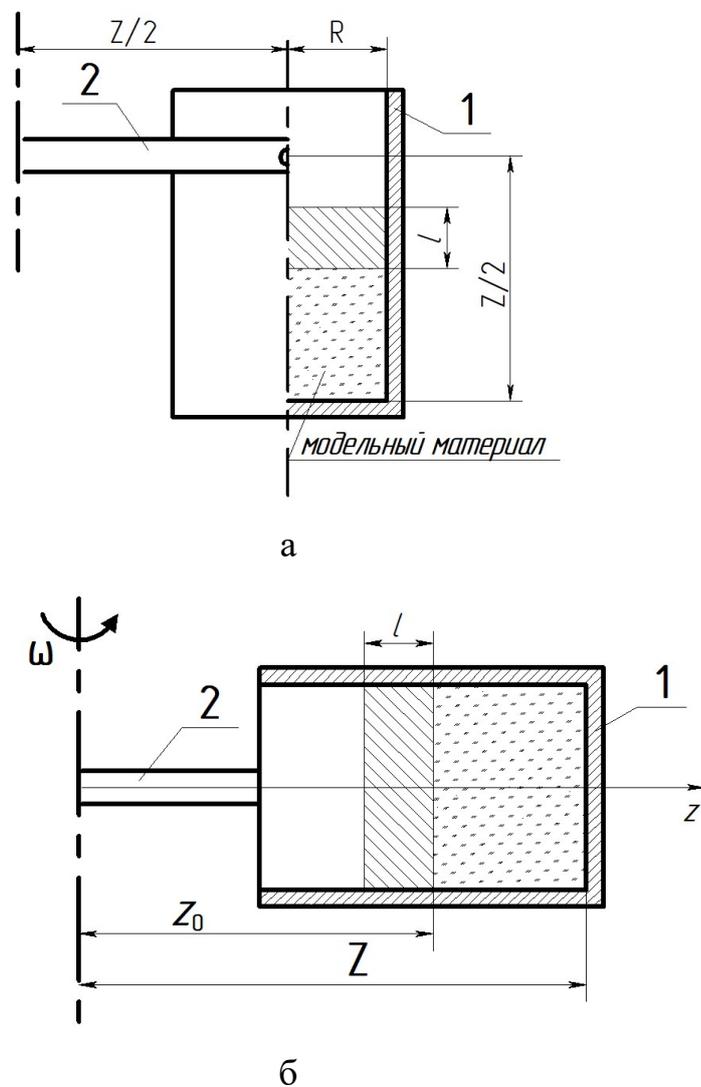


Рисунок 2.6. Схема второго этапа процесса формирования прессовки из порошкового материала в поле действия центробежных сил.

На первом этапе осуществляется процесс уплотнения порошка воскообразного модельного материала полностью соответствующий схеме, представленной на рисунке 2.5. Ротор центрифуги вращается со скоростью от 3000 до 4000 об/мин, что позволяет увеличить плотность порошка воскообразного модельного материала на 10 – 15 %, т.е. материал перестает быть сыпучим.

На рисунке 2.6 представлена схема реализации второго этапа процесса получения пористых выплавляемых моделей тел вращения в поле действия центробежных сил. В пресс-матрицу добавляли присоединенную массу в виде шайбы, выполненную из стали 45 массой 0,125 кг, радиусом $R = 0,023$ м и высотой $l = 0,1$ м (рисунок 2.6,а). Далее в течение 7 минут вращали пресс-матрицу при скорости 3500 – 4000 об/мин (рисунок 2.6,б). В результате получали выплавляемые модели тел вращения с усредненной пористостью от 0 % до 10 % без поверхностных дефектов.

Для проведения численного анализа распределения свойств по объему прессовки при её уплотнении в поле действия центробежных сил использовали схемы, представленные на рисунках выше и схожих со схемами, приведенными в работе [146].

Центробежные силы, прикладываемые к каждой частице уплотняемого воскообразного материала, запишутся в виде:

$$\vec{F} = m\vec{\omega} \times (\vec{r} \times \vec{\omega}) \quad (2.13).$$

При такой постановке вектор силы будет иметь две ненулевые компоненты

$$F_x = mr_x\omega^2, F_z = mr_z\omega^2 \quad (2.14)$$

То есть, под действием центробежных сил уплотняемый порошковый воскообразный материал будет двигаться по направлению ко дну стакана (под влиянием компоненты F_z) и расходиться от центра стакана (а именно от оси y) к его стенкам вдоль оси x (под действием компоненты F_x). В дальнейшем будем считать влияние компоненты F_x малым и в расчётах примем её равной нулю. Ввиду того, что предварительно пресс-матрица обрабатывалась керосином, также пренебрежём силами трения, возникающими на стенках стакана и препятствующими продвижению материала к его донной части. Таким образом центробежная сила будет зависеть

только от компоненты F_z , что значительно упрощает задачу. Будем рассматривать весь объем порошкового материала как состоящий из n слоёв, высоту каждого слоя обозначим за h_i^j (где $i=1, \dots, n$ – номер слоя, j – номер итерации процесса расчёта). Отсчёт ведём от верхнего слоя ($z=z_0$) до слоя на дне стакана ($z=Z$). На начальной итерации $j=0$ зададим высоты слоёв равными между собой

$$h_i^0 = \frac{Z-z_0}{n} = \frac{H}{n} \quad (2.15)$$

где H – высота прессовки.

Массу m распишем через значение плотности $m=\rho V=\rho HS$.

Если поделим центробежную силу F_z на площадь поперечного сечения пресс-матрицы $S=\pi R^2$, то получим значение напряжения, создаваемое i -ым слоем прессуемого материала

$$\sigma_i^j = \sum_{l=1}^i \rho_l^j h_l^j z_l^j \omega^2, \quad z_i^j = Z - \sum_{l=n}^{i+1} h_l^j \quad (2.16)$$

Так как напряжение σ_{i-1}^j взаимосвязано с плотностью ρ_i^j процесс расчета проходил в два этапа. На первом этапе находятся значения давления на текущей итерации j по известным плотностям с предыдущей итерации $j-1$. Вторым шагом по найденному давлению производим перерасчёт плотностей каждого слоя. Расчет повторяется до тех пор, пока разница плотностей между итерациями не будет достаточно мала. Для проведения такого расчёта нужно знать зависимость плотности уплотняемого воскообразного материала от давления прессования $\rho = \rho(\sigma)$. Такие расчеты приведены в пункте 3.1.1 настоящей работы. Используя полученные в этом разделе работы данные, а именно адаптированную для нашего воскообразного модельного материала формулу Ждановича, зависимость плотности от напряжения примет вид:

$$\rho = \rho_{max} \theta = \rho_{max} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{max}} (1 - \theta_0^m) + \theta_0^m \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2.17)$$

Таким образом, используя приведенные выше равенства производили расчет распределения плотностей порошкового тела по высоте пресс-матрицы.

Для численного анализа второго этапа процесса уплотнения порошкового тела в поле действия центробежных сил, необходимо проинтегрировать компоненту F_z в формуле (2.14) для случая с равномерно распределенной плотностью по всему объему прессовки и поделить на площадь поперечного сечения пресс-матрицы S . Таким образом мы получаем значение напряжения σ_{add} , которое будет оказывать добавочная масса на уплотняемое порошковое тело на его верхней границе $z = z_0$:

$$\sigma_{add} = \frac{m_{add}}{S} \left(z_0 - \frac{1}{2} l \right) \omega^2 \quad (2.18)$$

где m_{add} — масса и l — высота присоединенного груза.

По мере прессования граница соприкосновения поверхности порошкового тела с присоединенной массой сдвигается в направлении от центра вращения матрицы к ее периферии $z = Z$.

2.5. Методики экспериментального определения прочности на сжатие и упругих характеристик прессовок, выполненных из порошкового воскообразного материала

При нанесении слоев керамической оболочковой формы на выплавляемую модель, последняя испытывает преимущественно сжимающую нагрузку. Таким образом прогнозирование прочности на сжатие выплавляемых моделей для получения биметаллической отливки является важной частью исследования для разработки производственной технологии. В данном разделе работы устанавливали влияние режимов уплотнения порошка воскообразного модельного материала на разрушение при свободном сжатии полученных цилиндрических образцов. Очевидно, что прочностные характеристики прессовок, полученных с большей пористостью, будут отличаться от характеристик материала прессовки с меньшей пористостью. Для этого исследования на универсальной испытательной машине «AG-X plus

Shimadzu» прессовки с разной пористостью, полученные после уплотнения в закрытой пресс-матрице и уплотненные в поле действия центробежных сил, подвергались разрушению сжатием в соответствии с ГОСТ 4651-2014 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие». Полученные прессовки подвергали сжимающему нагружению до разрушения со скоростью перемещения траверсы тестовой машины 22 мм/мин.

Для возможности последующего математического моделирования и прогнозирования процессов деформирования порошков воскообразных материалов определяли его упругие характеристики при помощи стесненного и свободного сжатия цилиндрических образцов. В рамках исследований представленных в работах [128, 147, 148], предназначенных для описания деформирования порошкового материала, проявляющего упругопластические свойства, модули упругости E и M при свободном и стесненном сжатии соответственно определяются экспериментально. Они связаны между собой соотношением: $M = E(1 - \nu)/(1 + \nu)/(1 - 2\nu)$ с учетом обозначения $\chi = E/M \leq 1$ следует выражение для коэффициента Пуассона:

$$\nu = \frac{\chi - 1 + \sqrt{(\chi - 1)(\chi - 9)}}{4} \quad (2.19)$$

Далее по полученным значениям находятся модуль сдвига G и объемный модуль упругости K :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}. \quad (2.20)$$

Испытания на свободное и стесненное сжатие проводили на универсальной испытательной машине Zwick Z100/SN5A с датчиком силы 1 кН. На рисунке 2.7 представлен внешний вид испытательной машины с установленной оснасткой для проведения испытаний на свободное сжатие (рисунок 2.7, а) и стесненное сжатие (рисунок 2.7, б). В качестве оснастки при стесненном сжатии использовалась толстостенная труба с двумя подвижными штоками и отполированной внутренней поверхностью. Скорость перемещения траверсы испытательной машины в обоих экспериментальных исследованиях составляла 3 мм/мин.

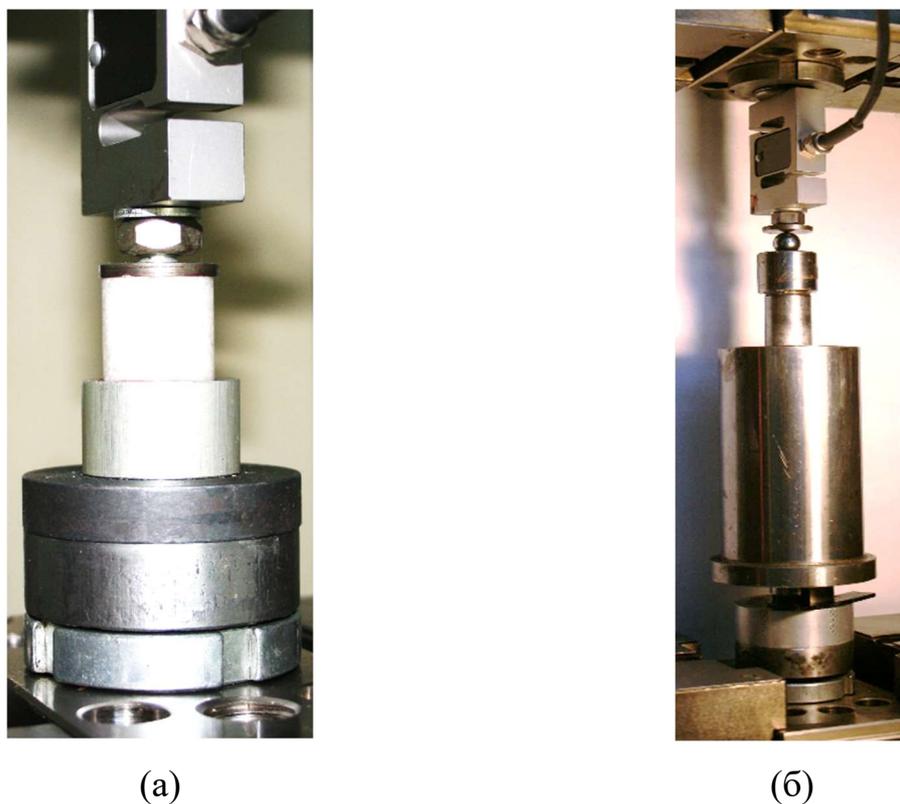


Рисунок 2.7. Оснастка для испытаний на свободное (а) и стесненное (б) сжатие.

Так как, свойства вязкоупругих и пластичных материалов зависят от предварительной нагрузки [ГОСТ 4651-2014 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие»], для получения более достоверных результатов изготавливались новые образцы. В качестве материала для изготовления образцов использовался порошок парафина марки Т1 фракции 0,63 мм. Образцы изготавливались цилиндрической формы с диаметром 20 мм. Масса навески для каждого образца составляла $5,5 \pm 0.01$ г порошка воскообразного модельного материала. Порошок модельного материала засыпался в оснастку для испытаний на стесненное сжатие и подвергался уплотнению до необходимой высоты. Высота прессовок составляла 21 – 22 мм. Всего на свободное сжатие испытано 8 образцов с диапазоном значений начальной плотности $0,79\text{--}0,86$ г/см³, на стесненное сжатие – 9 образцов. Все поверхности контакта оснастки с образцами при их изготовлении и испытаниях были обработаны смазкой ЦИАТИМ-221Ф.

2.6. Методики проведения экспериментального определения влияния начальной упаковки частиц на процесс деформирования воскообразного порошкового материала в закрытой пресс-матрице

Для экспериментального исследования влияния начальной упаковки на напряженно-деформированное состояние прессованного тонкостенного участка пористой выплавляемой модели биметаллической отливки проводилось моделирование различного однослойного расположения элементов сферической формы в зазоре между стальным каркасом и стенками пресс-матрицы. За основу формирования точных биметаллических отливок сложной пространственной конфигурации принимается метод литья по выплавляемым моделям [23, 24, 149]. Схема моделирования процесса получения прессованных пористых элементов выплавляемой модели биметаллической отливки представлена на рисунке 2.8.

Рисунок 2.8,а иллюстрирует момент предшествующий началу деформирования воскообразного порошкового материала. Процесс уплотнения порошкового тела осуществляется следующим образом. Стальную пресс-матрицу 1 устанавливают на основание 2. Внутри пресс-матрицы 1 помещают стальной каркас 3 и жестко фиксируют его в основании. Для осуществления процесса прессования на каркас устанавливают удлиняющий элемент 4. В полученный между стенками пресс-матрицы 1 и частями каркаса 3, 4 укладывают сферические элементы воскообразного материала 5. Высота слоя сферических воскообразных элементов определяется из суммы высоты каркаса выплавляемой модели h_m и высоты удлиняющего элемента каркаса h_n из выражения 2.16:

$$H = h_m + h_n \quad (2.21)$$

На рисунке 2.8,б изображена конечная стадия получения пористой прессованной выплавляемой поверхности модели биметаллической отливки. Процесс деформирования сферических элементов 5 осуществляется с помощью пресс-пуансона 6. Ход пресс-пуансона 6 ограничивается высотой каркаса 3 пористой выплавляемой поверхности модели.

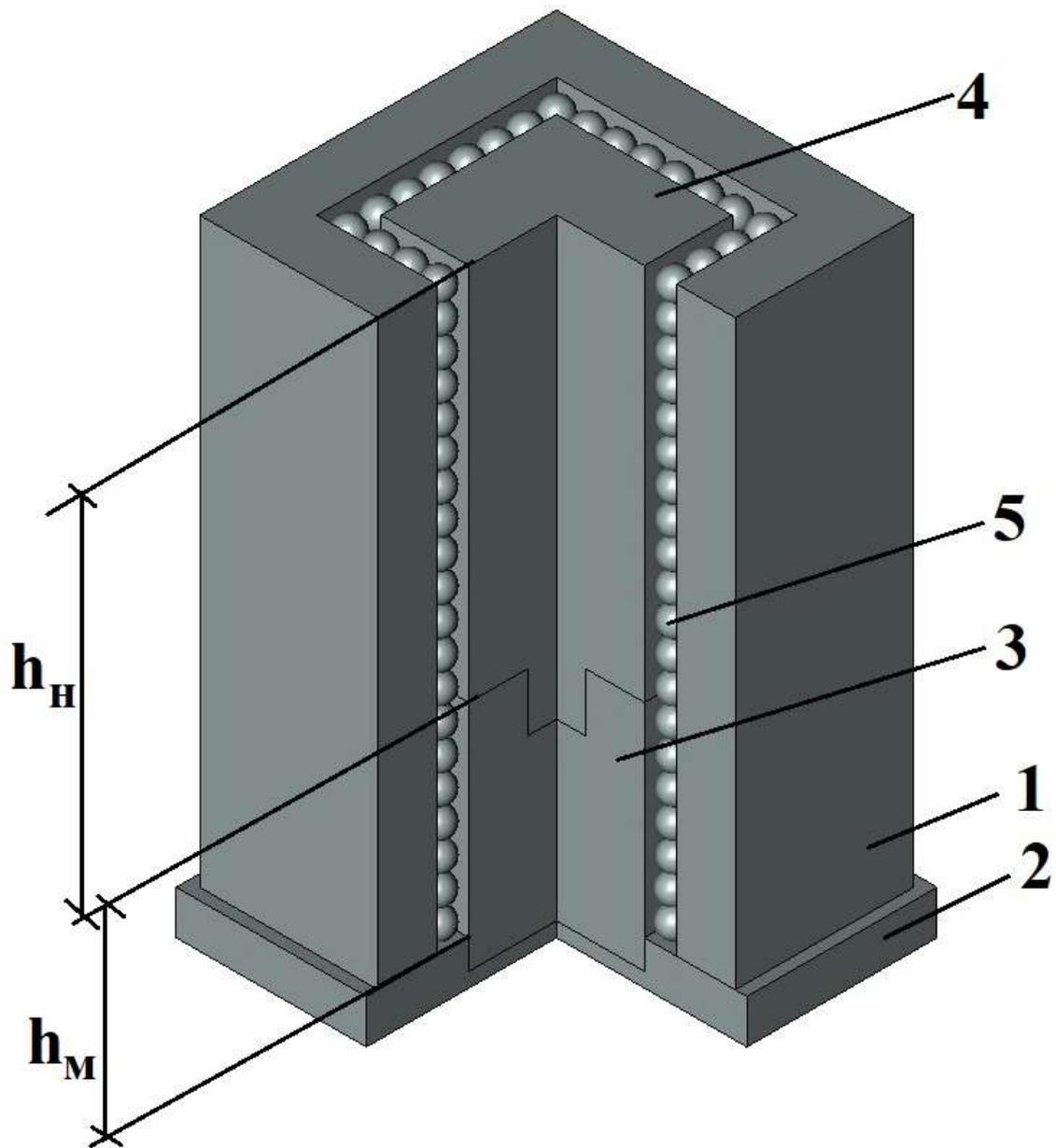


Рисунок 2.8,а. Начальная стадия процесса получения пористой поверхности модели биметаллической отливки.

Для реализации моделирования путем заливки в специальную форму расплавленного воскообразного материала марки Т1 изготавливались сферические элементы диаметром 10 мм. Для имитации водорастворимых компонентов использовались сферические элементы размером $\text{Ø } 10 \text{ мм}$, изготовленные из стали 45

(ГОСТ 1050-2013 «Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия», модуль Юнга стальных элементов $E = 210$ ГПа и плотность $\rho = 7810$ кг/м³). Выбор такого типа компонентов обусловлен следующими соображениями:

- предварительными экспериментальными данными установлена предпочтительность деформирования равных по размеру компонентов порошкового тела [8];
- прочность на сжатие водорастворимых компонентов значительно выше, чем прочность на сжатие сферических элементов, выполненных из воскообразного материала марки Т1.

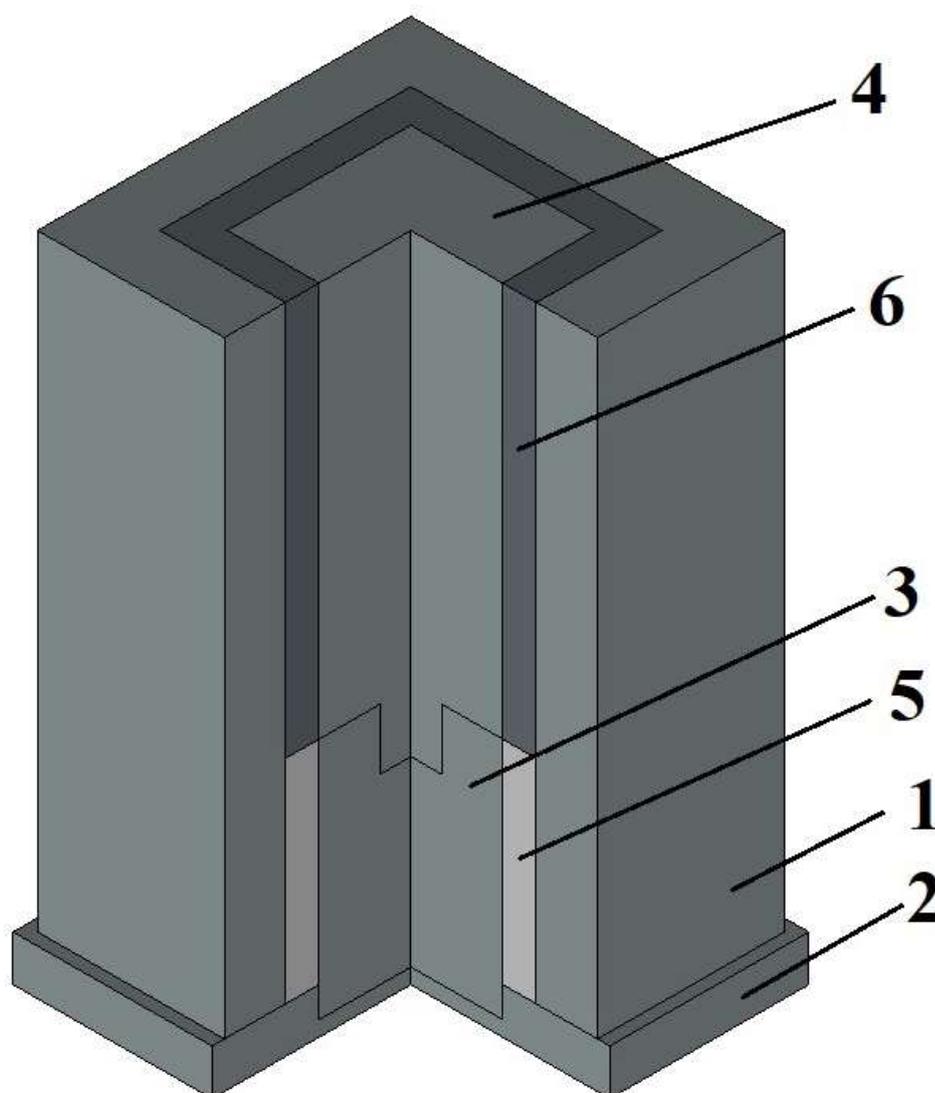


Рисунок 2.8,б. Конечная стадия процесса получения пористой выплавляемой поверхности модели биметаллической отливки.

При обработке экспериментальных данных принимаем, что деформация элементов, имитирующих водорастворимые, равна нулю, и эти компоненты предназначены для передачи нагрузки воскообразным сферическим элементам в виде условно несжимаемого наполнителя.

Для повышения достоверности эксперимента и минимизации влияния деформации оснастки на процесс уплотнения, пресс-матрица выполнена из стали 45. Для визуализации эксперимента 2 стенки пресс-матрицы выполнены из прозрачного пластика, деформацией которого также можно пренебречь. Внутренняя полость оснастки выполнена в виде параллелепипеда с размерами: высота – 90 мм, длина – 50 мм, ширина – 10 мм. На рисунке 2.9 представлены схемы однослойного расположения сферических элементов во внутренней полости пресс-матрицы.

Черным цветом на рисунках 2.9, г и 2.9, д показаны упругие элементы из стали 45, имитирующие водорастворимые компоненты, в количестве 20 % и 50 % соответственно.

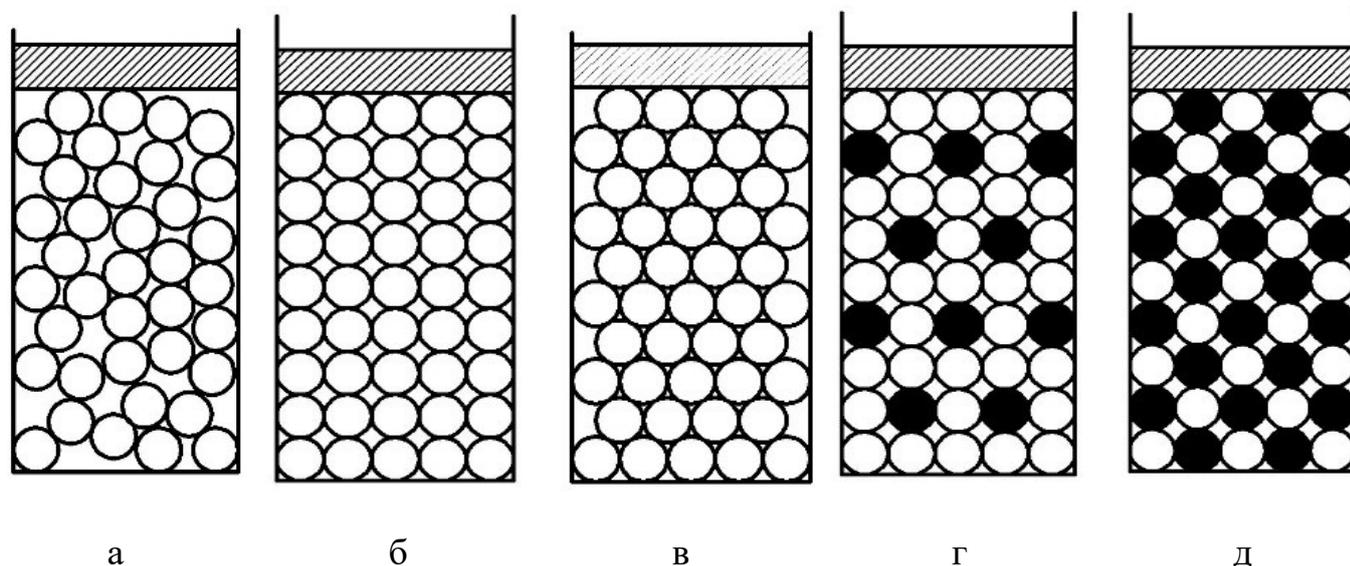


Рисунок 2.9. Схемы начального размещения сферических элементов в пресс-матрице в момент времени, предшествующий началу деформации:

а – свободная упаковка; б – тетрагональная упаковка; в – гексагональная упаковка; г – тетрагональная упаковка с 20% упругих элементов; д – тетрагональная упаковка с 50 % упругих элементов.

В таблице 2.2 представлены начальные условия формирования прессовок из сферических элементов.

Таблица 2.2. Начальные условия формирования прессовок

Вариант размещения элементов, представленный на рис.3	а	б	в	г	д
Суммарный объем воскообразных деформируемых элементов, см ³	45	45	43,75	40	33,5
Плотность упаковки элементов, кг/м ³	340	445	460	445	445
Число воскообразных элементов в пресс-матрице, шт.	34	45	45	35	23
Доля объема, занимаемого деформирующимися воскообразными элементами в пресс-матрице V_d , %	40	52	54	59	65

Из рисунка 2.9 и таблицы 2.2 можно сделать вывод, что координационное число, определяющее число контактов элементов состава между собой, имеет значительное влияние на плотность упаковки компонентов.

Экспериментальное исследование проводилось путем установки на стенд универсальной испытательной машины «AG-X plus Shimadzu» пресс-матрицы, заполненной сферическими элементами согласно схемам (рисунок 2.9). Для исследования влияния скорости деформирования на процесс уплотнения сферических элементов, исследования проводились при постоянных скоростях передвижения верхней подвижной траверсы испытательной машины, которая передавала нагрузку на пресс-пуансон. Исследование состояло из серий экспериментов с постоянными скоростями 0,5 мм/с и 3 мм/с. Скорость перемещения пресс-пуансона менее 0,5 мм/с нецелесообразна технологически. Скорость, превышающая значение 3 мм/с, приводит к появлению ярко выраженного фронта уплотнения, а, следовательно, неравномерности свойств прессовки по объему и увеличению упругого отклика воскообразной модельной композиции после снятия нагрузки. Уплотнение модельных материалов осуществляли до момента достижения материалом деформируемых

элементов пористости 10 %. Все экспериментальные исследования проводились при температуре окружающей среды 21 °С.

2.7. Методики получения протяженных прессовок экструзионным формованием воскообразного порошкового материала

Процесс формирования слоя из воскообразного материала в зазоре между внутренней полостью пресс-матрицы и стальным каркасом выплавляемой модели биметаллической отливки является малоизученным. Возможность получения длинномерных тонкостенных элементов пористых выплавляемых моделей биметаллических отливок с требуемой плотностью исследовалась с помощью процесса экструзионного формования, путем регулирования размера фракции воскообразного материала марки Т1, скорости перемещения пресс-пуансона и соотношения внутренних диаметров пресс-матрицы и диффузора.

Процесс экструзии условно разделяется на три стадии [95]:

1. Уплотнение материала внутри пресс-матрицы и заполнение канала мундштука. На данном этапе происходит перераспределение частиц порошка материала и их уплотнение в пресс-матрице (характеризуется ростом нагрузки до пикового значения, которое соответствует заполнению прессуемым материалом диффузора).

2. Ламинарное истечение материала из мундштука (является установившимся процессом, при котором значение нагрузки прессования незначительно снижается).

3. Турбулентное истечение материала из мундштука (является заключительной стадией процесса экструдирования и характеризуется увеличением скорости истечения материала из пресс-матрицы и как правило появлением поверхностных дефектов).

Экспериментальное моделирование процесса экструзионного формования, схема которого представлена на рисунке 2.10, проводилось с помощью универсальной испытательной машины «AG-X plus Shimadzu» [150].

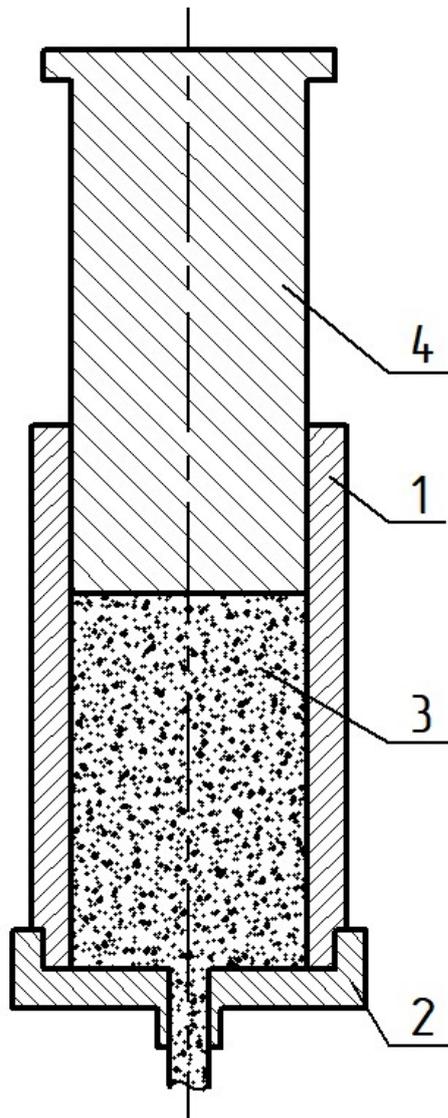


Рисунок 2.10. Схема экспериментальной установки процесса экструзионного формования воскообразного порошкового материала с прямой формой крышки. 1- пресс-матрица; 2 – крышка с мундштуком; 3 – пресс-пуансон; 4 – порошок воскообразного материала марки Т1.

Для реализации исследования влияния технологических условий процесса экструзии на стенд испытательной машины устанавливалась цилиндрическая пресс-матрица диаметром 45 мм – 1. В нижней части пресс-матрицы расположена крышка с мундштуком 2. Диаметр диффузора 9 мм, форма – прямая, что позволяет моделировать условия затрудненного истечения материала из пресс-матрицы. Таким образом, соотношение площадей сечений получаемой длинномерной прес-совки к площади поперечного сечения пресс-матрицы составляет 1 к 25. В прес-

матрицу засыпался порошок воскообразного модельного материала 3 фракциями 0,63 и 2,5. Процесс прессования осуществлялся при помощи пресс-пуансона 4 при постоянной скорости в каждой серии исследования. Для разных серий экспериментов скорость перемещения пресс-пуансона изменялась в интервале 0,5 – 1,5 мм/с [47]. Процесс прессования продолжали до момента полного выдавливания воскообразной модельной композиции из пресс-матрицы.

Для регистрации температурных режимов воскообразного модельного материала при экструзии из пресс-матрицы к диффузору подводилась термопара типа ТП.ХА(К).Н, подключенная к цифровому регистратору Ш9329/1. Схема подключения термопары показана на рисунке 2.11.

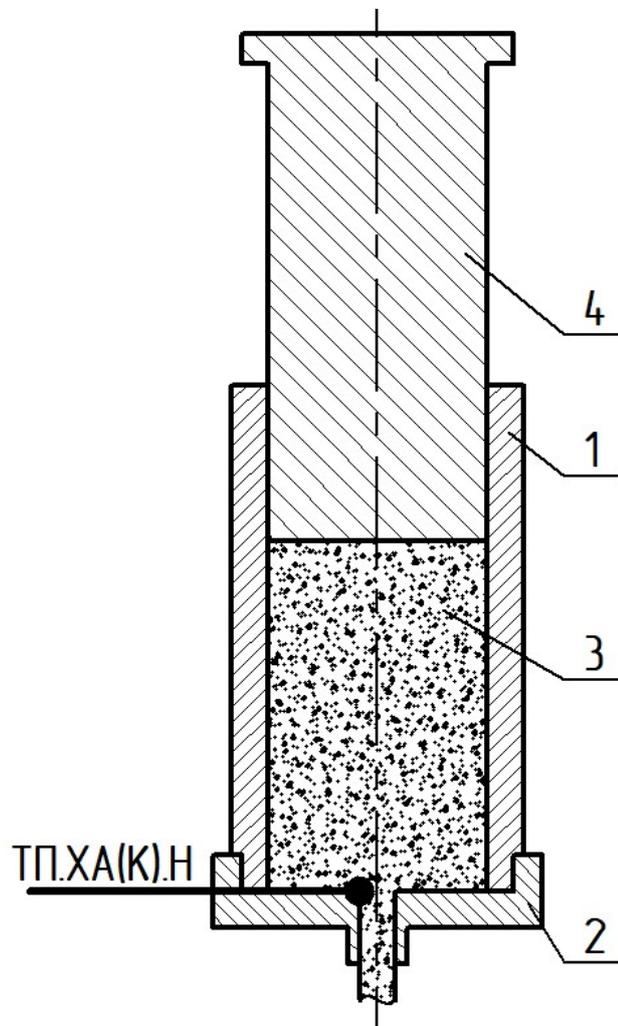


Рисунок 2.11. Схема подключения термопары типа ТП.ХА(К).Н к прямому диффузору. 1 – цилиндрическая пресс-матрица; 2 – крышка с мундштуком; 3 – порошок воскообразного материала; 4 – пресс-пуансон.

Известно, что при экструзии воскообразного материала из прямой пресс-матрицы возможно возникновение мертвых зон [151], для изучения влияния которых на процесс прессования, а также изучения влияния формы диффузора на силовые характеристики процесса экструзии и на размерно-геометрическую точность длинномерной прессовки, была изготовлена дополнительная крышка матрицы, внутренняя поверхность которой, выполнена конической, с углом наклона образующих 60° (рисунок 2.12).

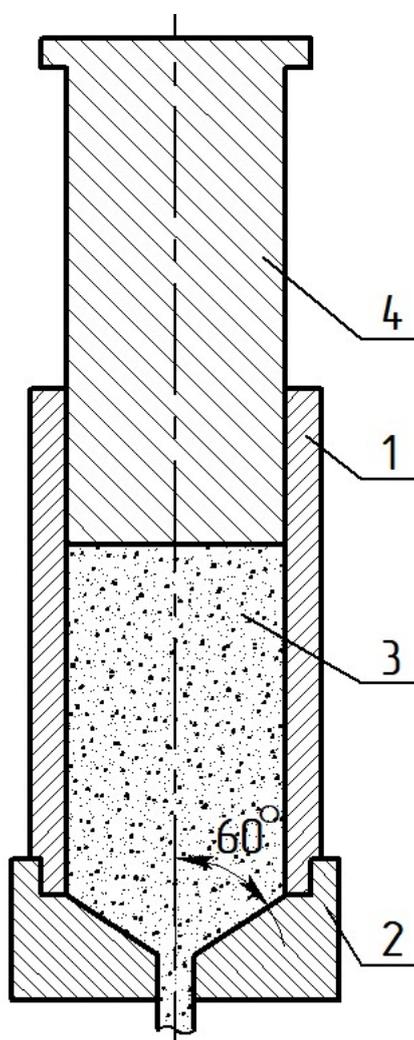


Рисунок 2.12. Схема экспериментальной установки процесса экструзии воскообразного материала в пресс-матрице с конической формой диффузора крышки. 1- пресс-матрица; 2 – крышка с мундштуком; 3 – пресс-пуансон; 4 – порошок воскообразного материала марки Т1.

Для исследования влияния соотношения площади поперечных сечений пресс-матрицы и диффузора на силовые параметры процесса экструдирования и плотность получаемой длинномерной прессовки в ходе серий экспериментов соотношение площадей поперечных сечений диффузора и внутренней полости пресс-матрицы увеличивалось от 1/60 до 1/6. Схема реализации экспериментального исследования представлена на рисунке 2.13.

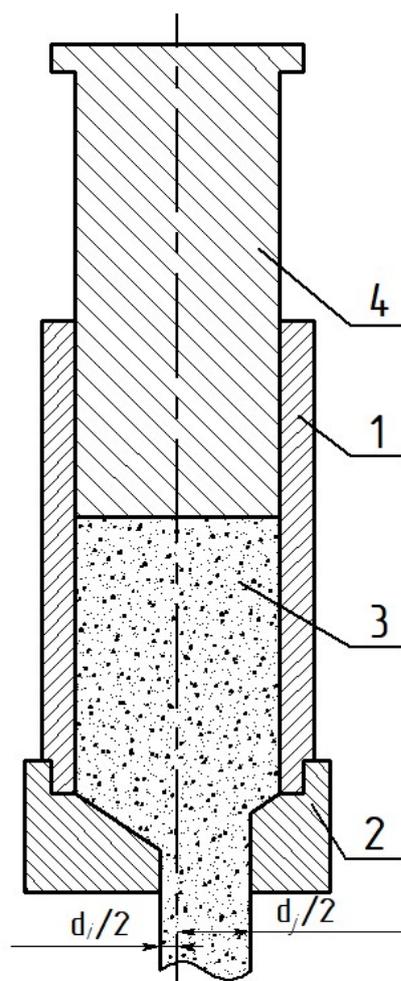


Рисунок 2.13. Схема экспериментальной установки для исследования влияния диаметра диффузора на процесс экструзионного формования порошка воскообразного материала.

В целях определения размерно-геометрической точности получаемой длинномерной прессовки на выходе из диффузора крышки с шагом 50 мм проводили измерение ее диаметра с помощью электронного цифрового регистратора DIN 863

Vogel с точностью измерения 0,001 мм. Величину изменений реального размера длинномерной прессовки от требуемого определяли по формуле (2.22):

$$O_{\text{упр}} = (D_1 - D_0) \cdot 100\% \quad (2.22)$$

где $O_{\text{упр}}$ – величина изменения размера, %; D_1 и D_0 – соответственно контролируемые размеры внутреннего диаметра мундштука и внешнего диаметра длинномерной прессовки, мм.

2.8. Выводы

1. Определены методики экспериментальных исследований уплотнения порошкового воскообразного материала при прямом прессовании в закрытой пресс-матрице и при уплотнении в поле действия центробежных сил.

2. При определении внутренних напряжений в прессовке, исследовании влияния условий деформирования на процесс прессования в закрытой пресс-матрице и экструзионном формовании порошкового материала использованы стандартные и известные методики, адаптированные к воскообразному материалу.

3. Экспериментальные исследования процессов уплотнения воскообразного модельного материала проводились с использованием высокоточной универсальной испытательной машины AG-X plus Shimadzu. С помощью тестовой машины Shimadzu DTG-60H определена температура плавления материала.

ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕССОВОК ИЗ ВОСКООБРАЗНОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧАЕМЫХ СТЕСНЕННЫМ СЖАТИЕМ

Получение высокоточных выплавляемых моделей с разнотолщинными участками из порошка воскообразного модельного материала затрудняется вследствие неравномерного распределения свойств по объему прессовки и действия внутренних напряжений в материале. Выявлено, что после снятия сжимающей нагрузки размер уплотняемого образца увеличивается на 0,4 – 1,2 % от номинального [4, 152]. С целью прогнозирования свойств конечного изделия, получаемого способом холодного прессования в закрытой пресс-матрице порошкового материала, необходимо всестороннее исследование технологического процесса. Для этого, как правило, применяется совокупность инструментов физического, математического и компьютерного моделирования. В мировой практике широко изучены процессы деформирования конструкционных материалов – порошков металлов [153, 154], полимерных порошков [121], огнеупорных материалов [107], грунтов. Воскообразный модельный материал, в качестве которого выбран парафин марки Т1, не является конструкционным, а его реологические свойства мало изучены, вследствие чего экспериментально-аналитическое исследование процесса уплотнения этого порошкового материала в закрытой пресс-матрице является актуальным и ориентированным на использование в условиях промышленных предприятий машиностроительного комплекса.

3.1. Условия деформирования порошковых воскообразных материалов для получения прессовок с заданной геометрией и плотностью

3.1.1. Зависимость напряжений, необходимых для уплотнения прессовок из воскообразного порошкового материала, от их заданной плотности

Идеализированный процесс деформирования порошковых материалов в закрытой пресс-матрице состоит из трех стадий [84, 101]:

1. Стадия структурной деформации (на этом этапе происходит перераспределение частиц порошка, разрушение «арок»).
2. На втором этапе происходит значительный рост давления прессования, сопровождающийся незначительными изменениями плотности порошковой засыпки.
3. Этап пластического деформирования (на этом этапе происходит фиксирование межчастичных контактов, их смещение прекращается, частицы материала по всему объему порошкового тела подвергаются пластической деформации; пластическая деформация порошкового материала происходит за счет давления прессования, трения о стенки пресс-матрицы и межчастичного трения [155]).

Экспериментально установлено, что процесс прессования воскообразных материалов в закрытой пресс-матрице, характеризуется взаимным наложением указанных выше стадий [96, 101, 156]. Рост плотности начинается уже на первом этапе деформации, при этом на равномерность пористости прессовки по всему объему значительное влияние имеет распределение частиц в конце второго этапа. Сложность прогнозирования конечной геометрии прессовки из порошковой воскообразной модельной композиции заключается в определении упругого отклика, возникающего за счет внутренних напряжений в прессовке после снятия нагрузки. На величину упругого отклика влияет значительное число факторов, среди которых в качестве основных, стоит отметить следующие: реологические свойства материала, размер фракции порошка, плотность прессовки, скорость прессования, время выдержки полученной прессовки под нагрузкой и т.д. [4, 13, 39, 129].

На рисунке 3.1 представлены зависимости напряжения от плотности при уплотнении порошкового воскообразного материала марки Т1 стесненным сжатием.

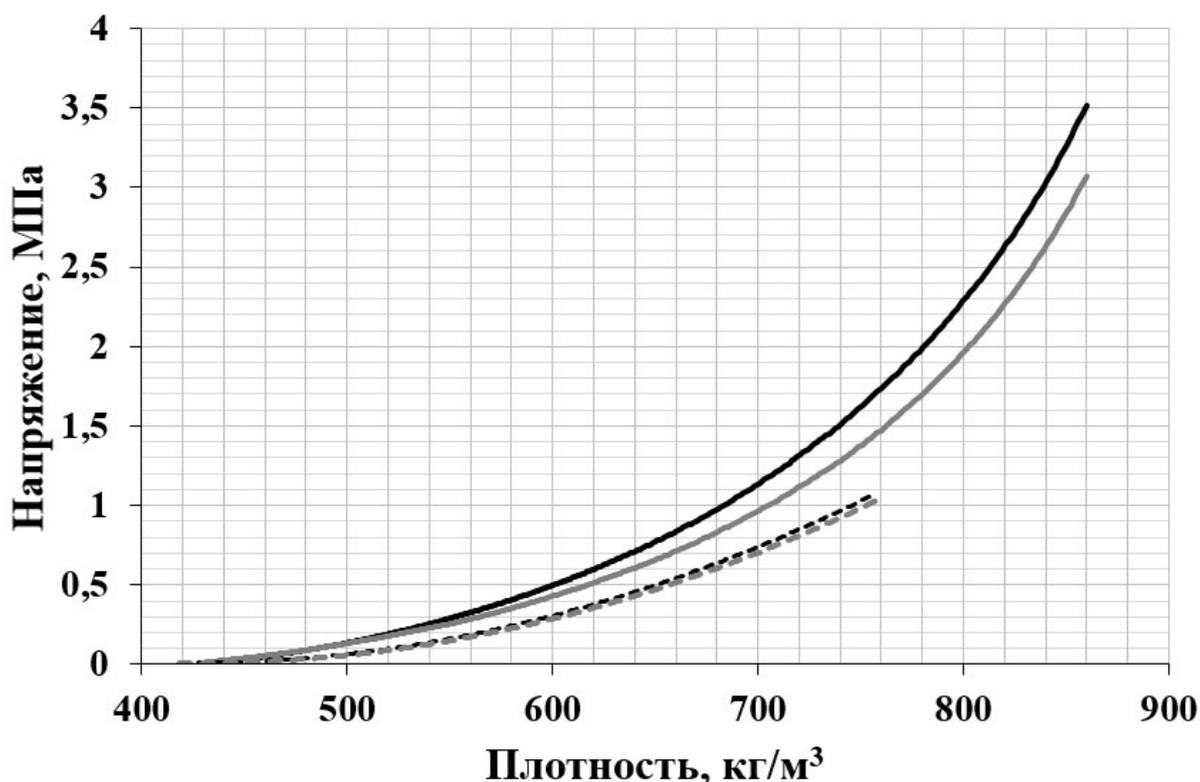


Рисунок 3.1 Зависимости напряжения от плотности воскообразного материала марки Т1 при его уплотнении в закрытой пресс-матрице.

Черным цветом показаны кривые, характерные для воскообразного материала фракции 2,5 мм, серым – для фракции 0,63 мм. Сплошными кривыми обозначены изменения напряжений для прессовок с пористостью $P_n = 0\%$, пунктирными – для значений пористости $P_n = 12\%$. Остальные значения напряжений, полученные в ходе эксперимента с шагом изменения пористости $P_n = 2\%$ лежат между показанными линиями.

Как видно из рисунка 3.1 для получения прессовки с плотностью $\rho_{\text{лит}} = 0,86$ г/см³ необходимы несколько большие усилия, чем для прессования до плотности на 12 % меньше $\rho_{\text{лит}}$. Также можно сделать вывод, что с увеличением пористости получаемых прессовок фракция воскообразного материала не оказывает значительного влияния на формирование напряжений в процессе уплотнения. При прессовании модели с пористостью $P_n = 0\%$ различия в значениях напряжений для прессовок разных фракций составляют 10,5 %. Для прессовок с пористостью $P_n = 12\%$

разница в значениях напряжений менее 5 %. Максимальные напряжения, необходимые для формирования прессовок с различной плотностью обозначим $\bar{\sigma}_0$. Таким образом, для прессовки с пористостью $\Pi_n = 0\%$ получаемой из воскообразного материала фракции 2,5 $\bar{\sigma}_0$ составляет 3,5 МПа, а из материала фракции 0,63 – 3,1 МПа. Для формирования прессовки с плотностью 757 кг/м³ и пористостью $\Pi_n = 12\%$ из фракции 2,5 напряжения $\bar{\sigma}_0$ не превышают 1,1 МПа, а из материала фракции 0,63 – 1,05 МПа. Остальные значения напряжений для процесса прессования воскообразного порошкового материала марки Т1 с плотностью, изменяющейся с шагом в 2 %, лежат в интервале значений между кривыми, изображенными на рисунке 3.1 и более подробно представлены в виде полиномиальных зависимостей 3-ей степени от пористости на рисунке 3.2. Представление экспериментальных зависимостей в виде полиномов позволяет упростить описание экспериментальных данных.

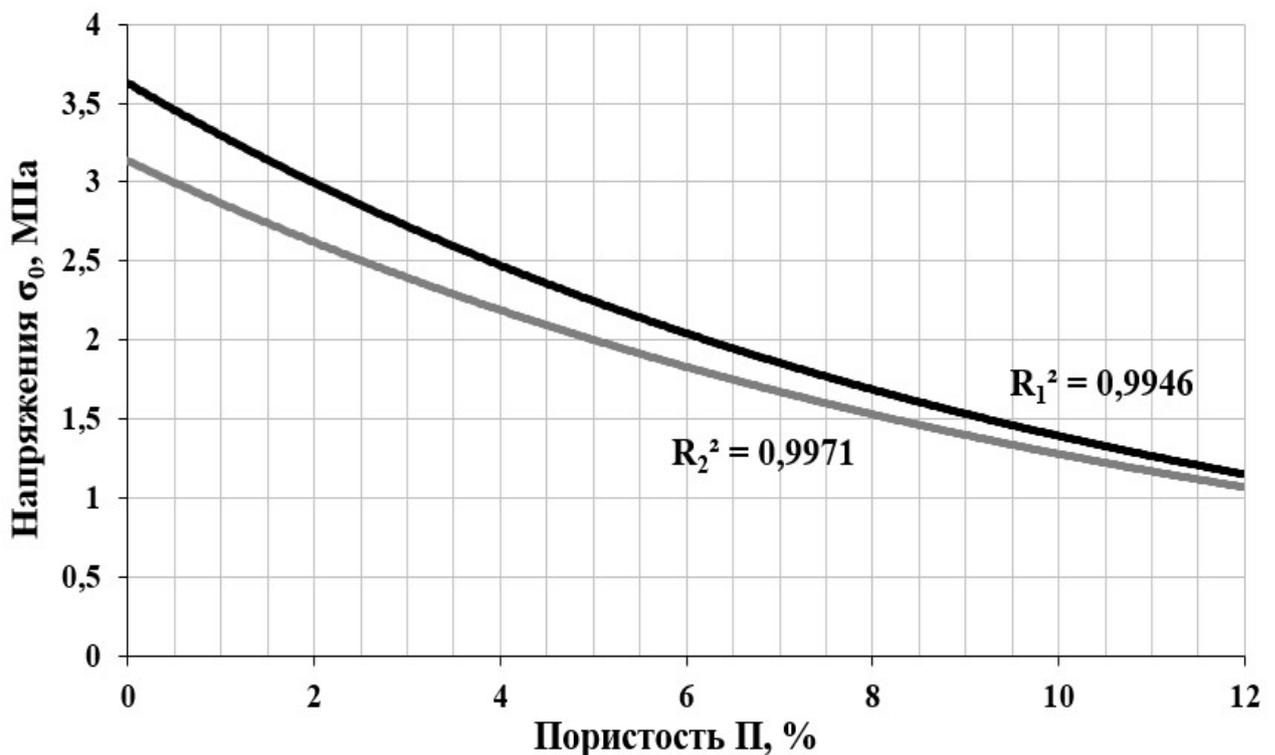


Рисунок 3.2. Зависимости напряжений $\bar{\sigma}_0$ от пористости Π в виде полиномов третьего порядка.

Черным цветом обозначена кривая, характеризующая величины напряжений для парафина марки Т1 фракции 2,5, серым цветом – для фракции 0,63. Также на рисунке 3.2 представлены значения величины достоверности аппроксимации R_1^2 и R_2^2 данных, полученных в ходе эксперимента, для фракций 2,5 мм и 0,63 мм соответственно.

Как видно из рисунка 3.2 с увеличением пористости P прессовки, сформированной из воскообразного порошкового материала марки Т1, значения напряжений, необходимых для формирования таких прессовок, уменьшаются. Причем с увеличением пористости P разница значений напряжений для разных фракций материала становится менее очевидной.

Для прогнозирования свойств пористых прессовок, выполненных из порошкового воскообразного материала, необходимо установить зависимости величины напряжений от плотности в каждый момент времени при уплотнении материала. Для этого экспериментальные данные аппроксимировали при помощи известных и широко распространенных формул Бальшина М.Ю. [84] (выражение 3.1) и Ждановича Г.Н. [100] (выражение 3.2), приведенных ниже:

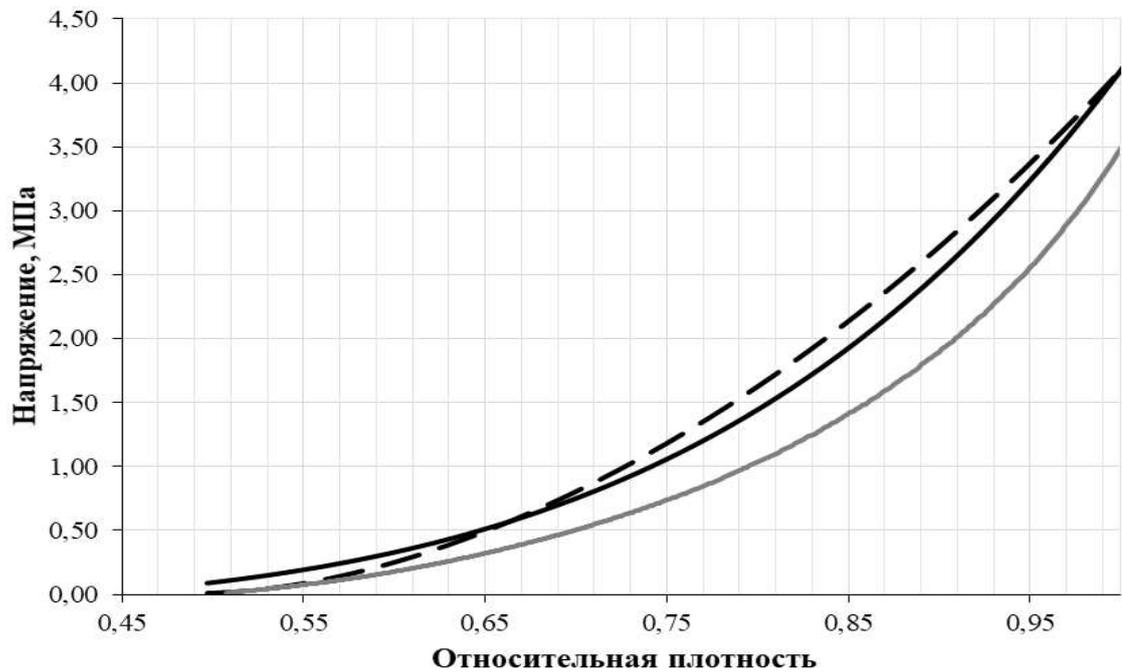
$$\sigma = \sigma_0 \theta^a, \quad a = 2 + \frac{\theta}{\theta - \theta_0}; \quad (3.1)$$

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\theta^a - \theta_0^a}{1 - \theta_0^a}, \quad a = 1 + \frac{2}{1 - \theta_0}, \quad (3.2)$$

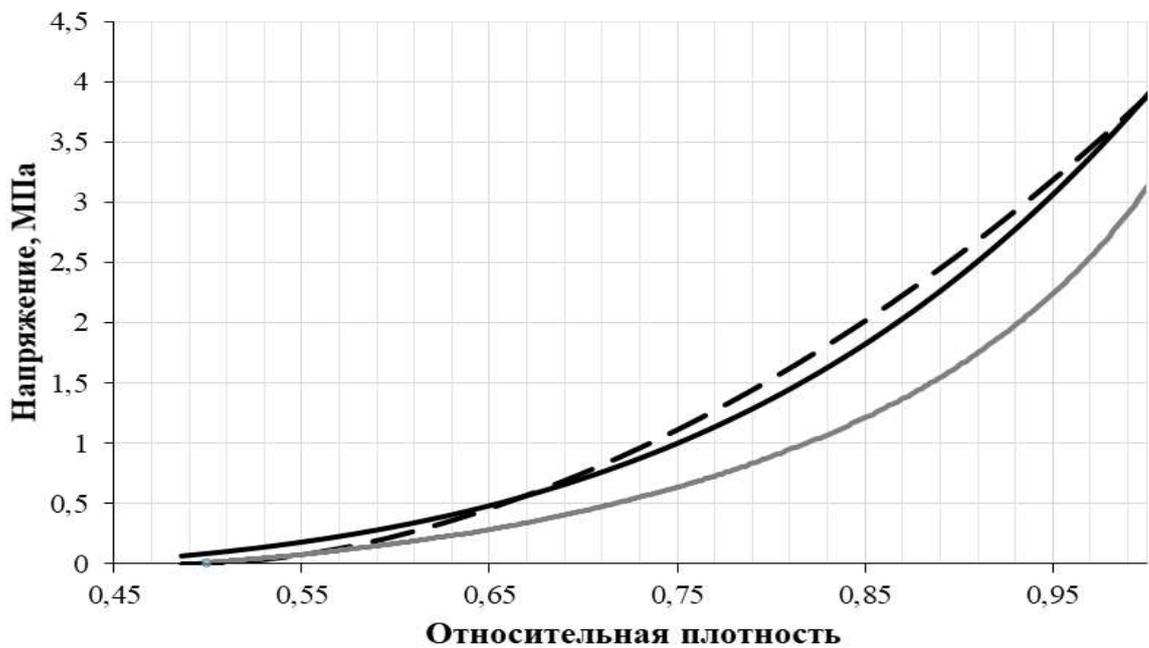
где σ_0 — максимальное значение напряжения, при котором плотность материала ρ прессовки достигает значения плотности материала в литом состоянии $\rho_{\text{лит}}$, $\theta = \rho/\rho_{\text{лит}}$ — относительная плотность, $\theta_0 = \rho_0/\rho_{\text{лит}}$ — относительная насыпная плотность, ρ_0 — насыпная плотность.

На рисунке 3.3 изображено сравнение экспериментальных кривых уплотнения воскообразного порошкового материала и расчетных, построенных с помощью формул Бальшина М.Ю. и Ждановича Г.Н. Рисунок 3.3,а иллюстрирует уплотнение порошка воскообразного материала фракции 2,5 мм, рисунок 3.3,б — фракции 0,63 мм. Серым цветом обозначены кривые, характерные для зависимостей напряжений

σ_i от относительной плотности θ , полученных экспериментальным путем. Черным цветом обозначены расчетные кривые: сплошная линия соответствует формуле Ждановича Г.Н., пунктирная – формуле Бальшина М.Ю.



а



б

Рисунок 3.3. Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей напряжения σ_i от относительной плотности θ : а – фракция 2,5 мм; б – фракция 0,63 мм.

Как видно из рисунка 3.3 расчетные кривые не совпадают с экспериментальными данными. Разница в значениях для воскообразного материала фракции 2,5 мм составляет 20 – 35 %, для материала фракции 0,63 мм эта разница составляет 15 – 20 %.

Для того чтобы аппроксимирующая функция более точно описывала экспериментальные данные, решено подобрать удобное численное значение показателя степени a в формуле Ждановича Г.Н. с помощью программного комплекса «Wolfram Mathematica». Для порошкового воскообразного материала фракции 2,5 мм показатель a равен 6,84; для материала фракции 0,63 мм – 7,12. На рисунке 3.4 представлено сравнение экспериментальных кривых (выделены серым цветом) уплотнения порошка парафина марки Т1 и расчетных кривых (выделены черным цветом). Сплошными линиями показаны кривые, соответствующие порошковому воскообразному материалу фракции 2,5 мм, пунктирными линиями – материалу фракции 0,63 мм.

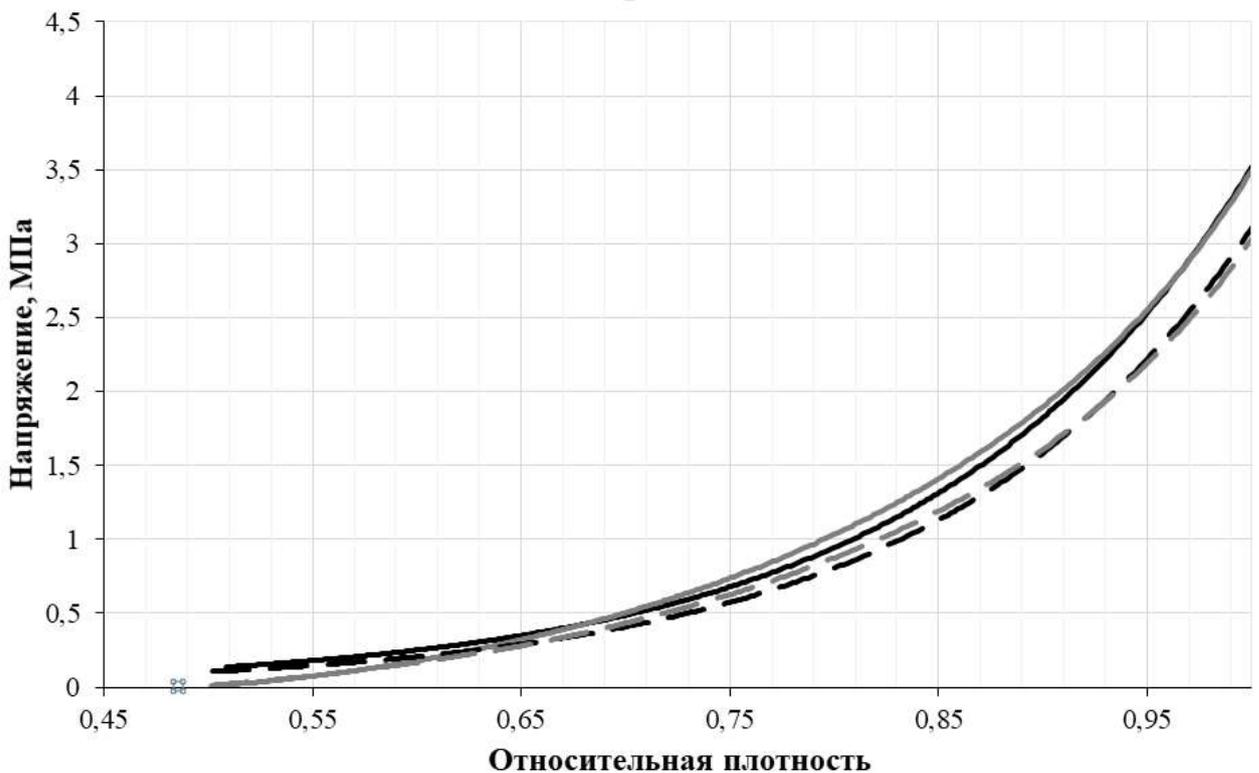


Рисунок 3.4. Сравнение экспериментальных и расчетных кривых уплотнения порошкового воскообразного материала.

Как видно из рисунка 3.4 полученные кривые в целом соответствуют экспериментальным данным, что обеспечивает их использование для прогнозирования процесса формирования пористых прессовок в производственных условиях.

3.1.2. Влияние времени выдержки уплотненного материала в нагруженном состоянии на релаксацию напряжений прессовок

На конечную геометрию тонкостенных протяженных элементов выплавляемой модели биметаллической отливки и величину упругого отклика материала прессовки влияют внутренние напряжения, которые могут регулироваться временем выдержки под нагрузкой уплотненного материала в пресс-матрице, подвижные элементы которой пребывают в сомкнутом состоянии. На рисунке 3.5 представлены полиномиальные зависимости третьего порядка напряжений при релаксации материала от времени выдержки образцов под давлением, при сомкнутых элементах пресс-матрицы.

Сплошными линиями показаны кривые, соответствующие конечной пористости $P_n = 0 \%$, пунктирными – $P_n = 12 \%$. Кривые 1 и 2 характерны для образцов, полученных из порошков воскообразного материала марки T1 фракции 2,5 мм, при их уплотнении, кривые 3 и 4 – характерны для материала фракции 0,63 мм, при их уплотнении до значений конечной пористости $P_n=0\%$ и $P_n=12\%$ соответственно. Таким образом, остальные кривые, полученные в ходе эксперимента, проводимого с шагом изменения пористости $P_n = 2 \%$ расположены:

- для порошкового материала фракции 2,5 мм – в области, ограниченной черными линиями;
- для порошкового материала фракции 0,63 мм – в области, ограниченной серыми линиями.

Для каждой полученной кривой рассчитывалась величина достоверности аппроксимации, обозначенная на рисунке 3.5 символом R^2 .

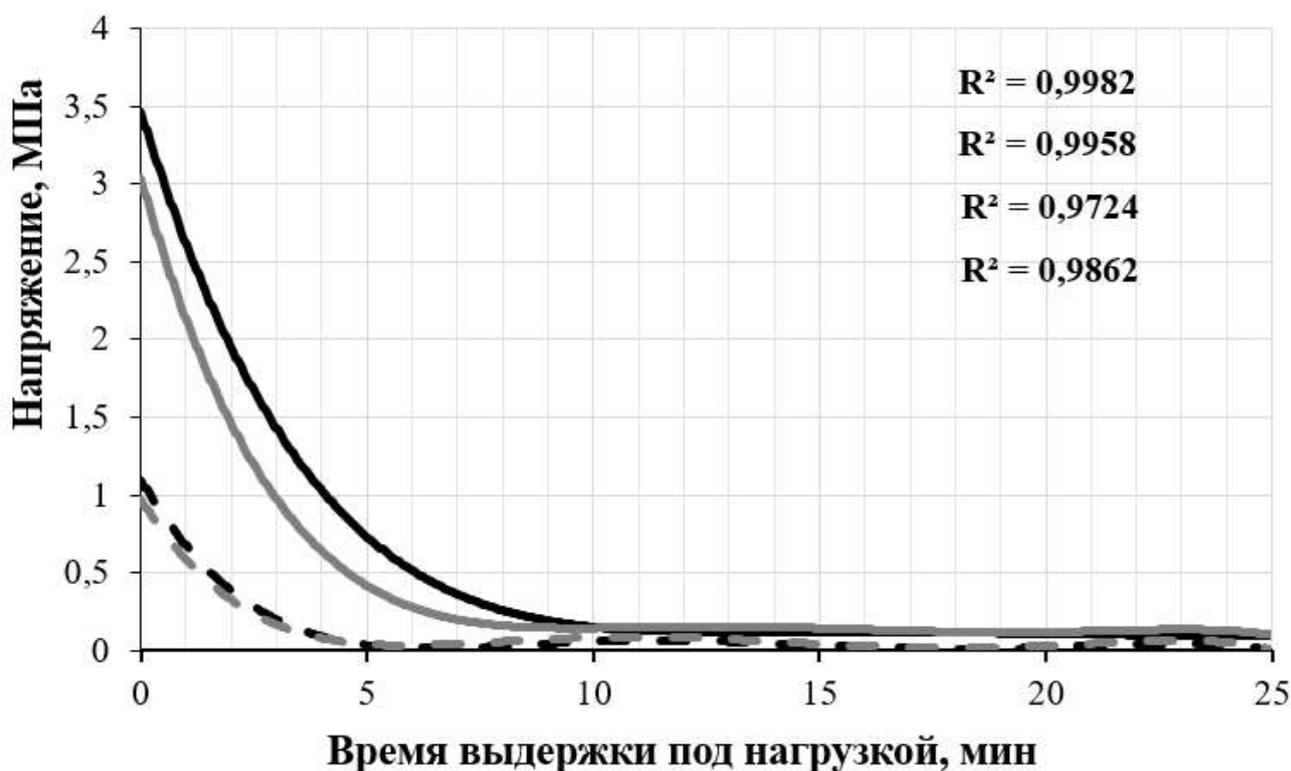


Рисунок 3.5. Полиномиальные зависимости 3-го порядка напряжений при релаксации прессовок из воскообразного материала марки Т1 от времени их выдержки под нагрузкой.

— - кривая 1; — — - кривая 2; — — — - кривая 3; — — — - кривая 4.

В ходе эксперимента установлено, что при времени выдержки образцов в нагруженном состоянии при сомкнутых подвижных элементах пресс-матрицы в течение 60 минут, заметные изменения напряжений, регистрируемых на траверсе универсальной испытательной машины, происходят в течении первых 10 минут для прессовок с пористостью $P_n = 0\%$ и первых 5 минут для прессовок с пористостью $P_n = 12\%$. Очевидно, что для прессовок, формируемых из порошков материала Т1 с меньшей пористостью, необходим более длительный интервал времени выдержки. Максимальные значения напряжений при релаксационных явлениях в образцах с конечной пористостью $P_n = 0\%$ на 10 минуте испытания не превышают значений 0,13 МПа. Максимальные значения напряжений на 5 минуте разгрузки прессовок с пористостью $P_n = 12\%$ не превышают 0,08 МПа.

При анализе данных, представленных на рисунке 3.5 видно, что напряжения, возникающие при уплотнении воскообразного материала более крупной фракции 2,5 мм превышают аналогичные значения для материала меньшей фракции 0,63 мм. Очевидно, этот факт объясняется большей насыпной плотностью порошкового тела (таблица 2.1). Также заметно, что при увеличении параметра пористости P_n происходит рост значений напряжений в среднем на величину 15 %. Изменение напряжения в зависимости от размера фракции и пористости может повлиять на значения упругого последействия и прочности получаемой прессовки, что в свою очередь влияет на размерно-геометрическую точность формируемого участка выплавляемой модели и наличие дефектов в готовом литом изделии.

3.1.3. Расчетные зависимости релаксации напряжений уплотненного материала от времени выдержки на основе экспоненциального уравнения Кольрауша

Для построения аналитических зависимостей напряжений σ_i в пористой прессовке из порошкового воскообразного материала марки Т1 во время процесса его релаксации, определялись расчетные параметры τ и k для последующей подстановки в уравнения (2.11) и (2.12). В таблице 3.1. представлены значения коэффициентов τ и k для прессовок с различной пористостью P_i в интервале значений от 0 % до 12 %. Из таблицы видно, что значения коэффициентов k и τ нелинейно уменьшаются с увеличением пористости P_i .

Подставляя полученные значения параметров τ и k в аналитическое уравнение релаксации материала (2.7) получаем расчетные кривые релаксации уплотненного материала. На рисунке 3.6 представлено сравнение экспериментальных кривых уплотнения прессовки из воскообразного порошкового материала Т1 с кривыми, полученными аналитическим путем. Рисунок 3.6,а иллюстрирует кривые, полученные для пористой прессовки, выполненной из воскообразного порошкового материала Т1 фракции 2,5 мм, рисунок 3.6,б – для фракции 0,63 мм. Серым цветом обозначены кривые, полученные экспериментальным путем, черным – рас-

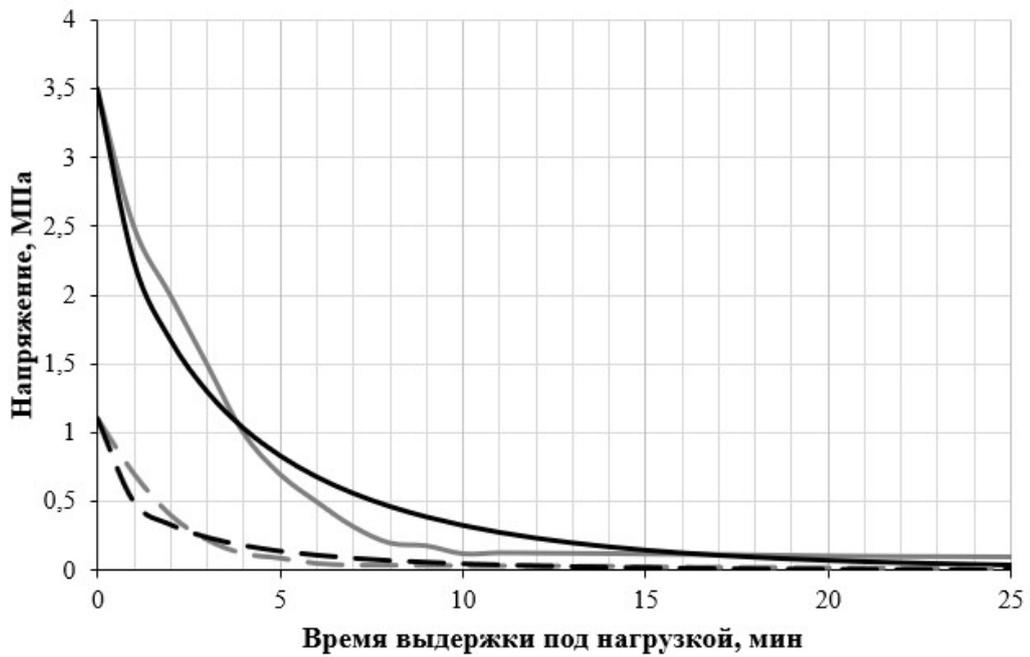
четные кривые. Сплошными линиями обозначены кривые, характерные для прессовок с пористостью $\Pi_i = 0 \%$, пунктирными при $\Pi_i = 12 \%$, остальные зависимости напряжений релаксации от времени выдержки прессовки под нагрузкой, выполненные с шагом пористости 2% располагаются в области между данными кривыми.

Таблица 3.1. Расчетные параметры k и τ для уравнения Кольрауша, определенные по экспериментальным данным.

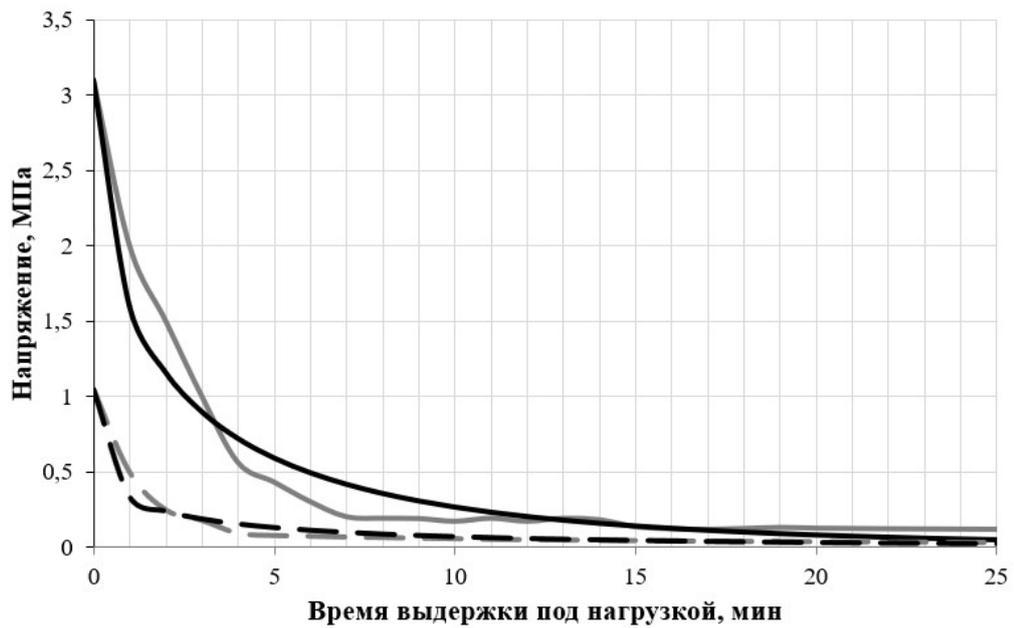
Фракция материала, мм	Пористость прессовки $\Pi_i, \%$	Параметры аналитического выражения	
		k	τ
2,5	0	0,729	3,034
	2	0,643	2,895
	4	0,614	2,357
	6	0,605	1,869
	8	0,595	1,523
	10	0,583	1,489
	12	0,589	1,478
0,63	0	0,568	2,058
	2	0,471	1,641
	4	0,424	1,223
	6	0,406	1,056
	8	0,348	0,842
	10	0,362	0,789
	12	0,375	0,706

Из рисунка 3.6 видно, что экспоненциальную динамику падения значений экспериментальных и расчетных кривых можно считать совпадающей. Для прессовок, полученных с пористостью $\Pi_i = 0 \%$ кривые напряжений σ_i , полученных экспериментальным способом, убывают несколько быстрее расчетных, в то время как для прессовок с пористостью $\Pi_i = 12 \%$ значения времени идентичны. Тем не менее, установлено, что к 5 и 10 минутам выдержки под нагрузкой, материал прессовок, выполненных из фракций 0,63 мм и 2,5 мм соответственно, для всех вариантов пористости релаксирует более чем на 90 %. Что свидетельствует об отсутствии

упругого отклика после снятия нагрузки и сохранению требуемой геометрии пористого прессованного тела.



а



б

Рисунок 3.6. 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.

3.2. Особенности уплотнения порошкового воскообразного материала в поле действия центробежных сил.

Формирование пористых прессовок уплотнением порошковых воскообразных материалов в поле действия центробежных сил позволяет получать выплавляемые модели тел вращения в условиях, обеспечивающих авторегулирование процесса распределения напряжений, а следовательно и плотности прессовки в направлении от центра вращения порошкового тела к его периферии.

Для прогнозирования зависимости распределения плотности прессовки по высоте пресс-матрицы от её угловой скорости вращения использовалась формула (2.16) с учетом (2.17). Усреднённая плотность находилась в соответствии с формулой $\rho_{\text{ср}} = V/m$. Для численных расчётов использовались следующие значения параметров: $\rho_{\text{max}} = 860 \text{ кг/м}^3$, $\rho_0 = 391 \text{ кг/м}^3$, $\sigma_{\text{max}} = 3,88 \text{ МПа}$, $m = 5,987177$, $m_{\text{add}} = 125 \text{ гр}$, $l = 10 \text{ мм}$.

На рисунке 3.7 представлено сравнение расчетной (1) и экспериментальной (2) зависимости усреднённой плотности прессовки от угловой скорости вращения формы с помещенным в нее порошком материала Т1 фракции 0,63 мм, полученными в процессе его уплотнения без добавочной массы. Экспериментальная кривая выполнена в виде полиномиальной кривой второго порядка, с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0.9924$.

Из рисунка 3.7 видно, что требуемый интервал значений плотности от 756 кг/м^3 до 860 кг/м^3 при угловой скорости вращения пресс-матрицы 4500 об/мин в обоих случаях не достигается. При этом кривые расчетной и экспериментальной зависимостей существенно отличаются друг от друга. По всей видимости это связано с некоторым количеством допущений, принятых при численном расчете. Очевидно, что задача достижения усредненной плотности прессовки может быть достигнута либо увеличением расстояния от оси ротора центрифуги до дна пресс-матрицы, либо увеличением угловой скорости вращения, что нецелесообразно ввиду высокой энергоёмкости процесса и сложности его реализации.

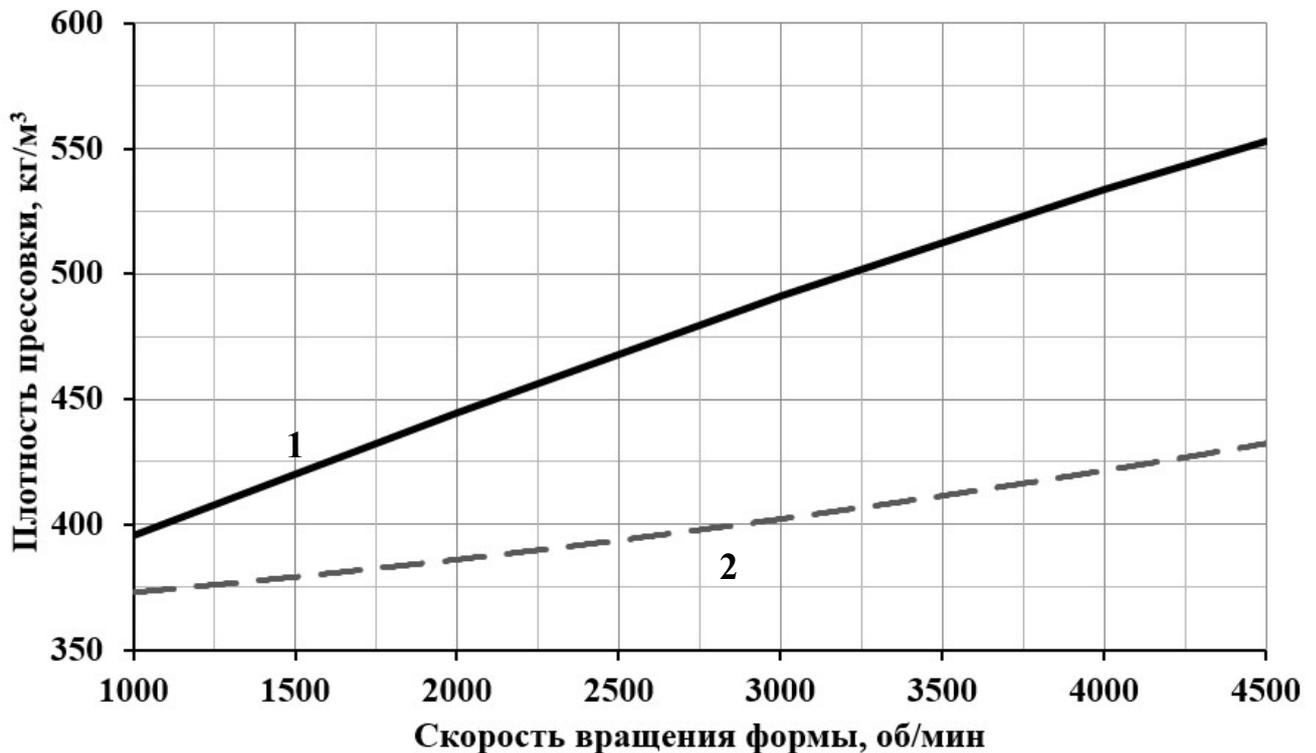


Рисунок 3.7. Зависимости усреднённой плотности прессовки из порошкового материала Т1 фракции 0,63 мм от скорости вращения формы: 1 – расчетная; 2 – экспериментальная.

На рисунке 3.8 представлено сравнение расчетной (1) и экспериментальной (2) зависимостей усреднённой плотности прессовки от угловой скорости вращения пресс-матрицы при уплотнении с добавочной массой порошка воскообразного модельного материала марки Т1 фракции 0,63 мм в поле действия центробежных сил. Видно, что требуемые значения плотности прессовок достигаются уже при угловой скорости вращения пресс-матрицы до 4000 об/мин.

На рисунке 3.9 представлены расчетные зависимости распределения плотности по высоте прессовки при угловой скорости равной 4500 об/мин для случаев прессования с добавочной массой (2) и без неё (1). Как видно, при такой скорости вращения в обоих случаях требуемые значения плотности прессовок не достигаются, в то время как в физическом эксперименте усредненное значение плотности прессовки соответствующее плотности материала в литом состоянии достигается уже при скорости 4000 об/мин. По всей видимости это связано с допущениями, принятыми при расчете.

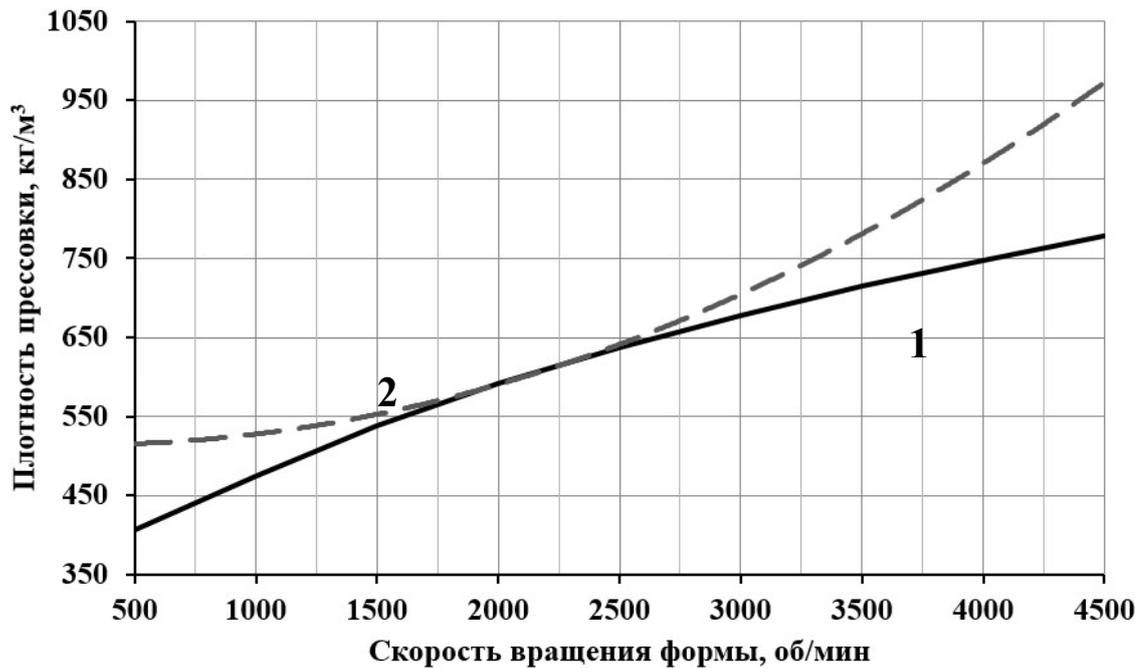


Рисунок 3.8. Зависимости усреднённой плотности прессовки из порошкового материала Т1 фракции 0,63 мм от скорости вращения матрицы с добавочной массой: 1 – расчетная; 2 – экспериментальная.

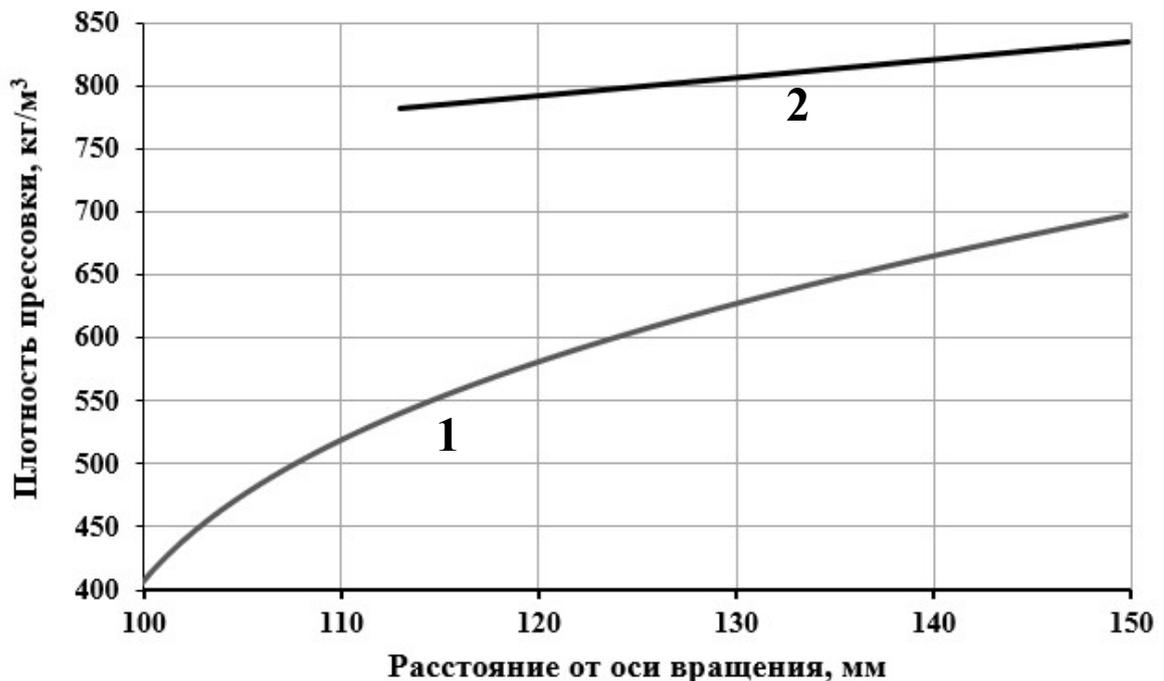


Рисунок 3.9. Распределение плотности прессовки из порошкового материала Т1 фракции 0,63 мм при скорости вращения в 4500 об/мин: 1 – без добавочной массы; 2 – с добавочной массой.

3.3. Влияние условий нагружения воскообразного порошкового материала при его уплотнении, на значения прочности на сжатие получаемых прессовок

На стадии послойного формирования керамической оболочковой формы, материалы выплавляемых моделей испытывают преимущественно сжимающую нагрузку (в ряде случаев, при массивном исполнении элемента модели возникает изгибающий момент). В связи с этим, является актуальным исследование прогноза прочности на сжатие пористых прессовок и, что важно, экспериментальное определение соотношения значения нагрузки, возникающей при прессовании воскообразного порошкового тела со значениями его прочности.

На рисунке 3.10 представлено сравнение зависимостей напряжений от деформации для цилиндрических прессованных образцов с пористостью $\Pi = 0\%$, полученных прямым прессованием в закрытой пресс-матрице (при скорости перемещения пресс-пуансона $0,5 \text{ мм/с}$) с полученными в поле действия центробежных сил. Черным цветом выполнены кривые, характерные для образцов изготовленных прямым прессованием воскообразных порошков в закрытой цилиндрической пресс-матрице, красным – для образцов, полученных прессованием в поле действия центробежных сил. Сплошные линии характерны для образцов, полученных из фракции $2,5 \text{ мм}$; пунктирные – из фракции $0,63 \text{ мм}$ соответственно.

Анализом зависимостей, представленных на рисунке 3.10 установлено, что прочность на сжатие образцов, сформированных в поле действия центробежных сил уступает значениям прочности прессовок, полученных в результате одностороннего уплотнения в среднем на 15% , что, однако, является достаточным для реализации задачи их дальнейшего технологического использования. Следует отметить, что для образцов, полученных при различных способах прессования характерно увеличение предела прочности на сжатие с увеличением фракции порошка воскообразного модельного материала, а следовательно, и максимальных напряже-

ний необходимых для уплотнения образца. Для варианта одностороннего одноосного уплотнения это увеличение составляет 7%, для варианта уплотнения в поле действия центробежных сил –12%.

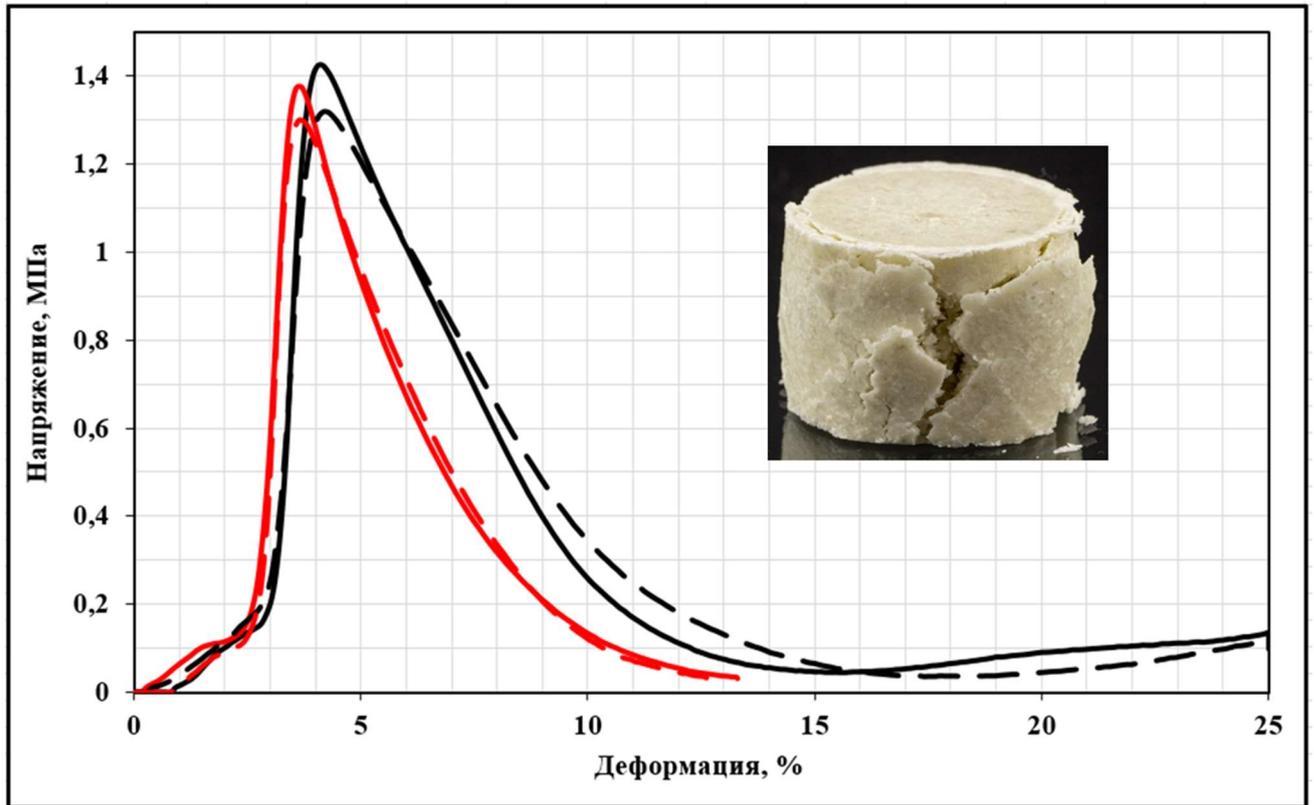


Рисунок 3.10. Зависимость напряжения от деформации при вертикальном одноосном сжимающем нагружении цилиндрических образцов

Для прогнозирования прочностных свойств пористых выплавляемых моделей из воскообразного порошкового материала проводилось испытание на сжатие, образцов, полученных прямым прессованием в закрытой пресс-матрице, с разной пористостью, изменяемой в интервале значений от $0\% \leq \Pi_n \leq 12\%$ с итерацией 2%. На рисунке 3.11 представлены зависимости предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ от пористости Π_n прессовок из воскообразного материала марки Т1 в виде полиномов 3-го порядка. Черная кривая характерна для материала фракции 2,5 мм, серая – 0,63 мм. Также на рисунке 3.11 представлены величины аппроксимации экспериментальных данных R_1^2 и R_2^2 для материалов этих фракций соответственно.

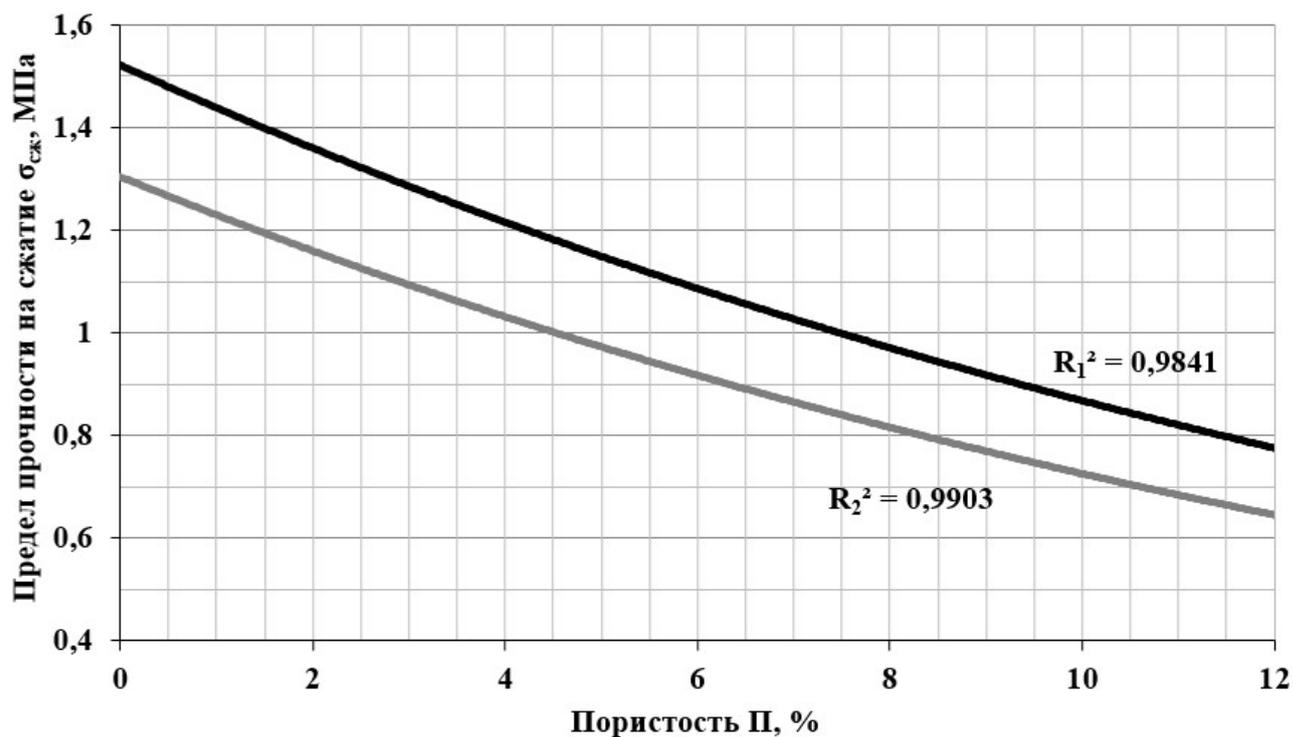


Рисунок 3.11. Полиномиальные зависимости предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ от пористости для парафина T1 фракций 2,5 мм и 0,63 мм.

Как видно из рисунка 3.13 значения пределов прочности $\sigma_{сж}$ на сжатие для материала более крупной фракции больше 2,5 мм, чем значения прочности прессовок, изготовленных из материала фракции 0,63 мм в среднем на 20 – 25 %. Таким образом, прессовки, полученные из порошков воскообразного материала крупной фракции лучше сопротивляются деформации сжатия при нанесении слоев огнеупорной оболочковой формы.

Для прогнозирования прочности элементов пористых выплавляемых моделей биметаллических отливок в производственных условиях уместно ввести показатель пропорциональности напряжений $N_{сж}$, рассчитываемый по формуле:

$$N_{сж} = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_0} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

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

На рисунке 3.12 представлены полиномиальные зависимости 3-го порядка показателя пропорциональности $N_{сж}$ от пористости P_n . С помощью данного показателя в производственных условиях возможно прогнозирование значений прочности на сжатие пористых выплавляемых моделей. Черным цветом выделена кривая характерная для воскообразного порошкового материала Т1 фракции 2,5 мм, серым – для материала фракции 0,63 мм. R^2 – величины аппроксимации экспериментальных данных. Как видно из рисунка коэффициент $N_{сж}$ увеличивается с увеличением пористости P_n , причем, чем больше пористость, тем большее влияние на значение прочности на сжатие имеет фракция воскообразного порошкового материала.

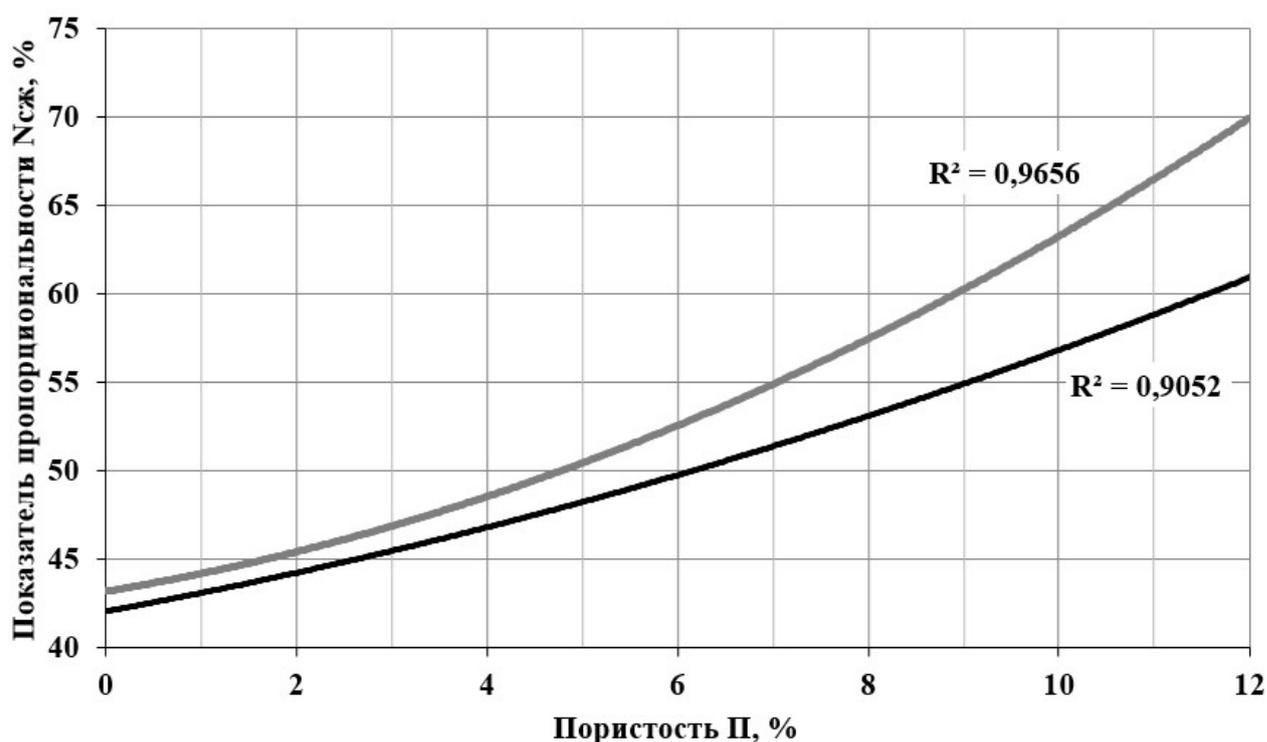


Рисунок 3.12. Зависимости показателя пропорциональности напряжений $N_{сж}$ от пористости P_n

Показатель пропорциональности показывает насколько напряжения, необходимые для уплотнения материала пористой прессовки больше предела ее прочности на сжатие. Так, например, для прессовки из парафина Т1 фракции 2,5 мм при

пористости $P_n = 6 \%$, значение предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ будет составлять 50 % от значения σ_0 , необходимого для уплотнения материала прессовки.

Для возможности математического моделирования уплотнения, различных видов нагружения и определения прочностных характеристик пористых выплавляемых моделей из воскообразного порошкового материала, в рамках данной работы предпринята попытка с помощью кэп-модели Димаджио – Сендлера определить упругие модули воскообразного модельного материала марки Т1 фракции 0,63 мм. На рисунке 3.13 приведены результаты свободного сжатия образцов. Рисунок 3.13, а иллюстрирует кривые деформирования при нагружении и разгрузке трех образцов, плотность которых соответствует значению $0,86 \text{ г/см}^3$. Высота прессовок менялась от $20,78 \pm 0,08$ до 20 мм, что соответствует деформации 4% и изменению плотности от $0,84 \text{ г/см}^3$ до $0,86 \text{ г/см}^3$. Среднее значение максимального напряжения при плотности $0,86 \text{ г/см}^3$ составляет приблизительно 1,05 МПа.

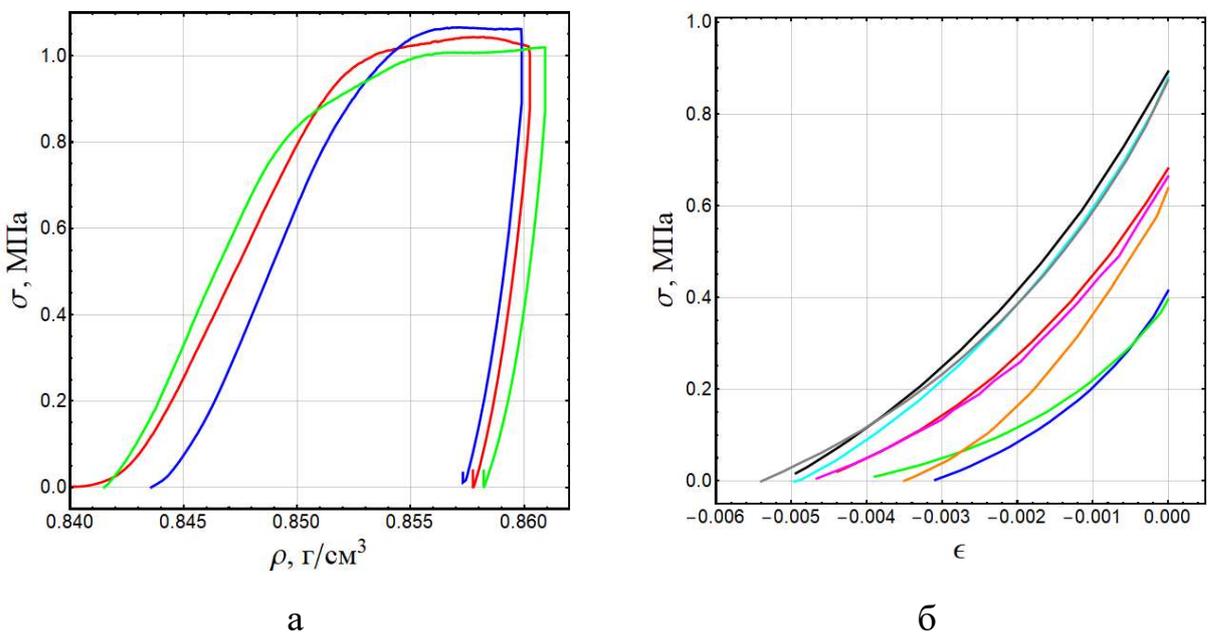


Рисунок 3.13. Кривые деформирования (а) и разгрузки (б) образцов при свободном сжатии.

На рисунке 3.13, б приведены кривые зависимости напряжения от осевой компоненты логарифмической деформации при разгрузке всех восьми исследуемых образцов. Компонента логарифмической деформации взята с противоположным знаком и отсчитывается с момента начала процесса релаксации материала образцов. В программном комплексе «Wolfram Mathematica» представленные кривые были аппроксимированы кубической функцией с четырьмя параметрами. Производная этой кривой в точке начала разгрузки является модулем упругости Юнга.

В отличие от свободного сжатия, которое можно выполнять при плотностях 0.83-0.86 г/см³, испытание на стесненное сжатие позволяет охватить весь диапазон — от насыпной плотности до плотности литого материала и даже выше. Испытание на стесненное сжатие при монотонном нагружении начиналось с состояния порошка с насыпной плотностью и заканчивалось при положениях траверсы, соответствующих высоте образца 22, 21 и 20 мм. На рисунке 3.14 а приведены деформационные кривые (выделены синим цветом) и их аппроксимация законом (выделены красным цветом):

$$\sigma_c = \gamma - \delta \ln \left(1 - \frac{\varepsilon}{W} \right). \quad (3.4)$$

с параметрами $\gamma = 0.02$ МПа, $\delta = 0.73$ МПа, $W = 0.63$. При аппроксимации учитывалось, что при стесненном сжатии полные объемная и осевая деформации равны между собой и равны пластическим составляющим, поскольку упругая деформация в испытаниях не превышает $3\text{МПа}/300\text{МПа}=1\%$, что намного меньше характерных деформаций в данном испытании, составляющих около 60%.

Для того, чтобы найти зависимость модуля упругости при стесненном сжатии от плотности порошкового воскообразного материала было проведено прессование модельного порошка со ступенчатым нагружением и промежуточными разгрузками. Так как при стесненном сжатии площадь поперечного сечения образца остается постоянной, то плотность порошкового воскообразного материала определяли по перемещению пресс-пуансона. На рисунке 3.14, б представлены полученные зависимости напряжений от плотности прессовки.

Модуль упругости при стесненном сжатии M определялся как производная кривой зависимости напряжений от деформации в момент начала разгрузки. Модули упругости при свободном и стесненном сжатии зависят от плотности порошкового воскообразного материала. На рисунке 3.15 представлены величины модулей упругости при свободном (выделены красным) и стесненном (выделены синим цветом) сжатии от плотности прессовок.

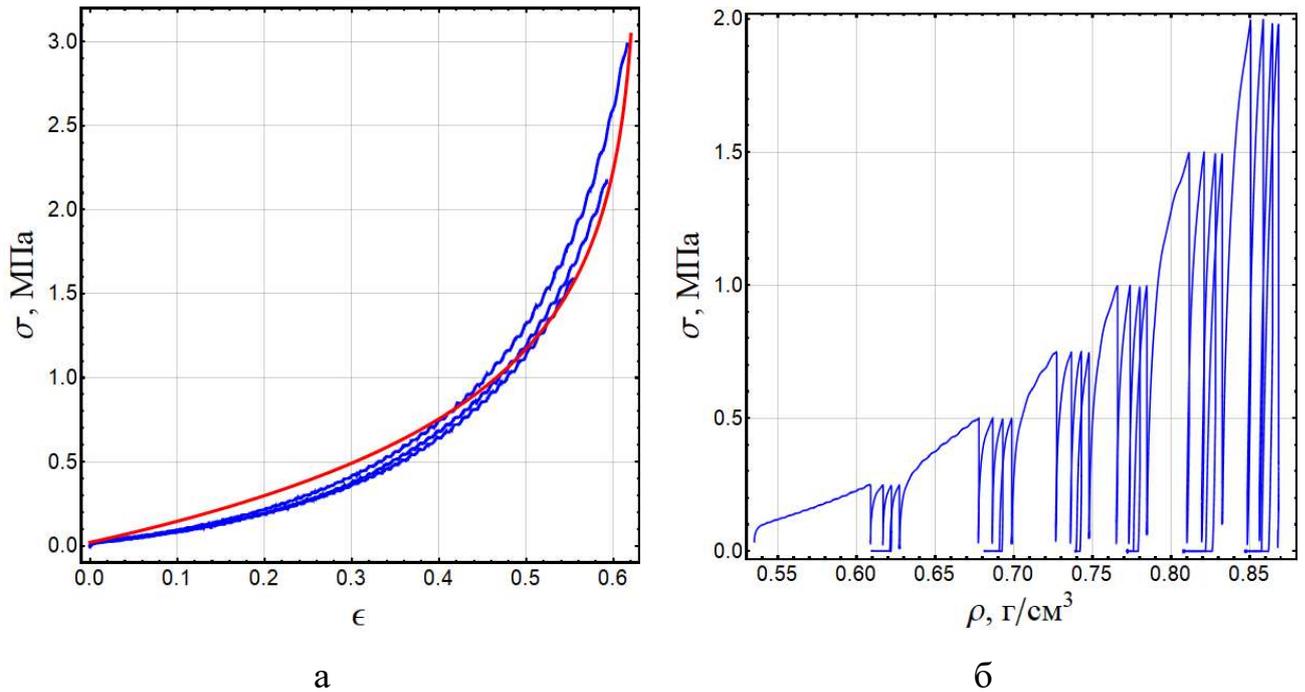


Рисунок 3.14. Кривые деформирования при стесненном сжатии: а) монотонное нагружение (синий — эксперимент, красный — аппроксимация); б) нагружение с разгрузками.

Результат для трех последних блоков нагружения приведен на рисунке 3.15. Были получены значения $M = 310, E = 270$ МПа при $\rho = 0.76 - 0.83$ г/см³ и $M = 345, E = 310$ МПа при $\rho = 0.85 - 0.87$ г/см³. Для сравнимых значений плотности можно оценить диапазон значений параметра $\chi = E/M = 0.87 - 0.90$ и по (2.19) — диапазон значений коэффициента Пуассона $\nu = 0.20 - 0.22$. Отметим, что данный метод не нуждается в измерении поперечных деформаций образца при свободном сжатии, которое не отличается точностью. Упругие константы сведены в таблице 3.2.

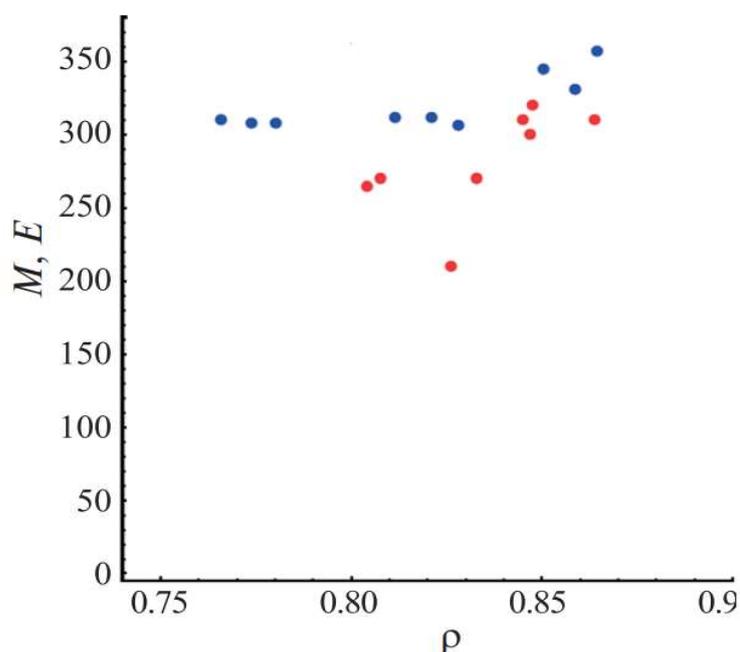


Рисунок 3.15. Упругие модули при свободном (красный) и стесненном (синий) сжатии в зависимости от плотности.

Таблица 3.2. Упругие константы парафина марки Т1
в зависимости от плотности

ρ , г/см ³	E , МПа	M , МПа	ν	G , МПа	K , МПа
0,76-0,83	270	310	0.22	111	160
0,85-0,87	310	345	0.20	129	172

3.4. Выводы

1. В ходе экспериментального исследования прессования порошка воскообразного материала стесненным сжатием установлено, что значения напряжений, необходимых для уплотнения частиц относительно крупной фракции (2,5 мм), выше, чем для уплотнения более мелкой фракции (0,63 мм). При этом величина напряжений также напрямую зависит от задаваемой конечной пористости прес-

совки. Чем меньше значение пористости прессовки, тем выше значения напряжений, необходимых для её уплотнения. При этом экспериментально установлено, что меньшим значением упругого отклика обладают прессовки с пористостью соответствующей интервалу $8 \% \leq \Pi_n \leq 12 \%$.

2. Представленные в работе расчётные зависимости напряжений от деформации позволяют в производственных условиях прогнозировать напряженно-деформированное состояние прессовки во время процесса уплотнения и релаксации напряжений пористой воскообразной модельной композиции.

3. Установлено, что для минимизации значений упругого отклика и сохранения геометрии пористые прессовки необходимо подвергать выдержке под нагрузкой после уплотнения. Напряжения σ_i , возникающие при релаксации материала прессовки, более чем на 90 % снижаются уже после 5 минут для материала, состоящего из частиц фракции 0,63 мм и 10 минут для фракции 2,5 мм.

4. В результате физического моделирования получения выплавляемых моделей тел вращения прессованием в поле действия центробежных сил установлено, что для получения прессовок с диапазоном усредненной пористости $0 \% \leq \Pi \leq 10 \%$ при условии использования пресс-пуансона в качестве присоединенной массы достаточно значений угловой скорости вращения уплотняемой системы не превышающих 4000 об/мин.

4. Значение прочности на сжатие пористых прессовок зависит от их плотности. Чем выше плотность, тем большие напряжения необходимы для разрушения образца. Прочность на сжатие образцов, сформированных в поле действия центробежных сил, уступает значениям прочности прессовок, полученных в результате одностороннего уплотнения в среднем на 15 %, что, в целом, является достаточным для реализации задачи их дальнейшего технологического использования. Построенные в ходе экспериментального исследования зависимости показателя пропорциональности ($N_{сж}$) от пористости (Π) позволяют прогнозировать значение прочности на сжатие полученных прессовок. Полученные упругие константы воскообразного порошкового материала, позволяют в дальнейшем осуществить расчетный прогноз прочностных характеристик прессовок.

ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ИЗ ВОСКООБРАЗНОГО МОДЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА НА КАРКАСЕ-ОСНОВЕ

4.1. Влияние начальной упаковки элементов воскообразного порошкового материала на процесс его деформирования стесненным сжатием

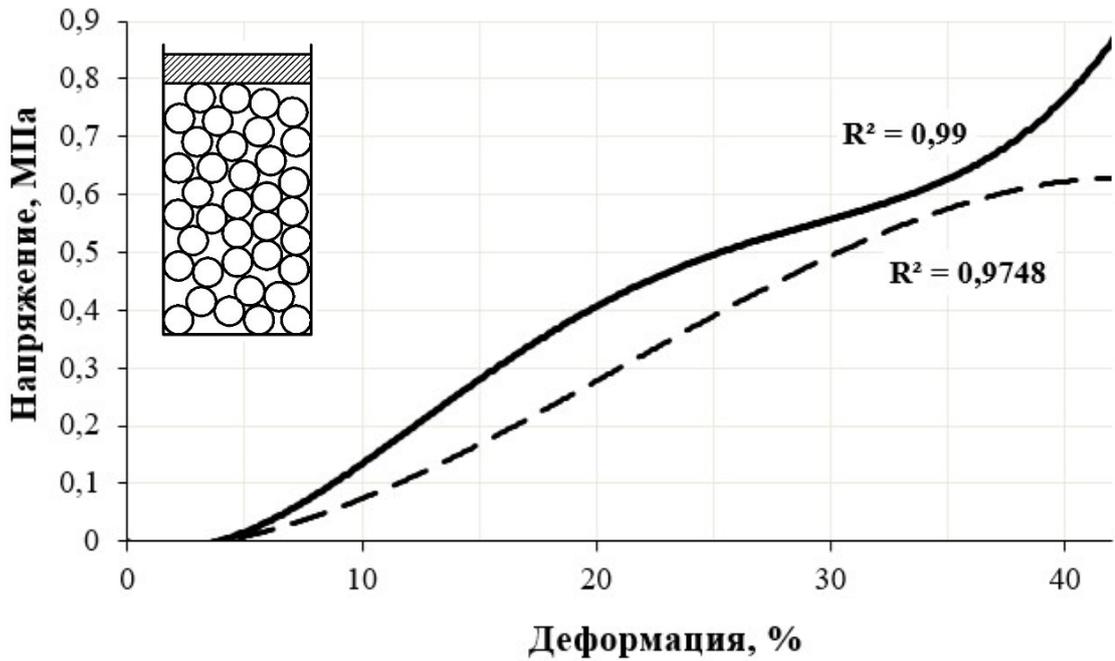
Так как на процесс стесненного сжатия порошка воскообразного материала Т1 существенное влияние имеет распределение частиц по всему объему формируемой прессовки, характерное для момента завершения второго этапа процесса уплотнения, актуальным является исследование влияния начальной упаковки компонентов (в нашем случае представленных в виде сферических элементов - гранул) порошкового материала на напряженно-деформированное состояние прессовки.

В ходе экспериментального исследования определялось влияние скорости перемещения пресс-пуансона на напряженно-деформированное состояние прессовки при различных вариантах начальной упаковки воскообразных шаровидных элементов.

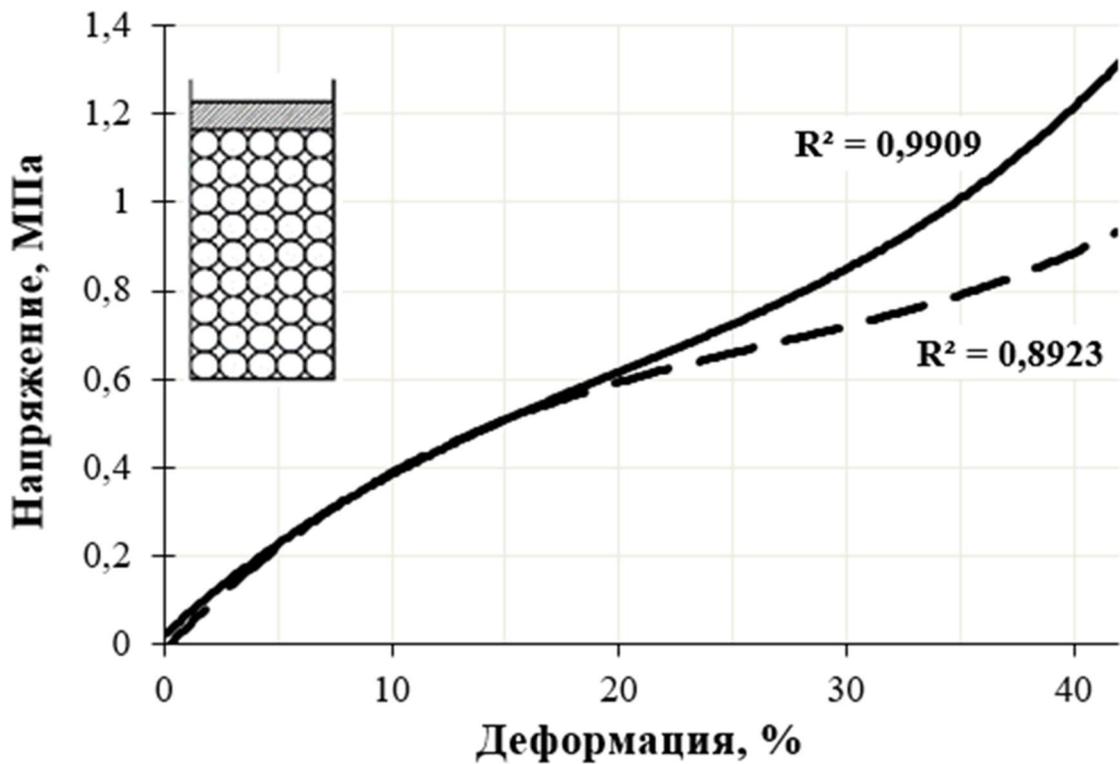
Установлено, что воскообразные материалы, исследуемые в данной работе, имеют относительно высокий предел текучести в сравнении с пределом прочности на сжатие [157–160]. Следовательно, процесс уплотнения таких материалов в закрытой пресс-матрице отличается от идеализированной картины. Зависимости напряжения, возникающих на траверсе тестовой машины, от деформации прессовки не будут иметь четких разделов стадий. Стадия структурной деформации, увеличение напряжений без роста плотности прессовки и пластическая деформация по всему объему образца будут проходить одновременно или накладываться друг на друга. Для исследования данного обстоятельства при прессовании шаровидных элементов из воскообразного материала марки Т1 строились экспериментальные зависимости напряжения от деформации.

На рисунке 4.1 представлены полиномиальные зависимости третьего порядка напряжения (МПа) от деформации (%) при одноосном уплотнении прессо-

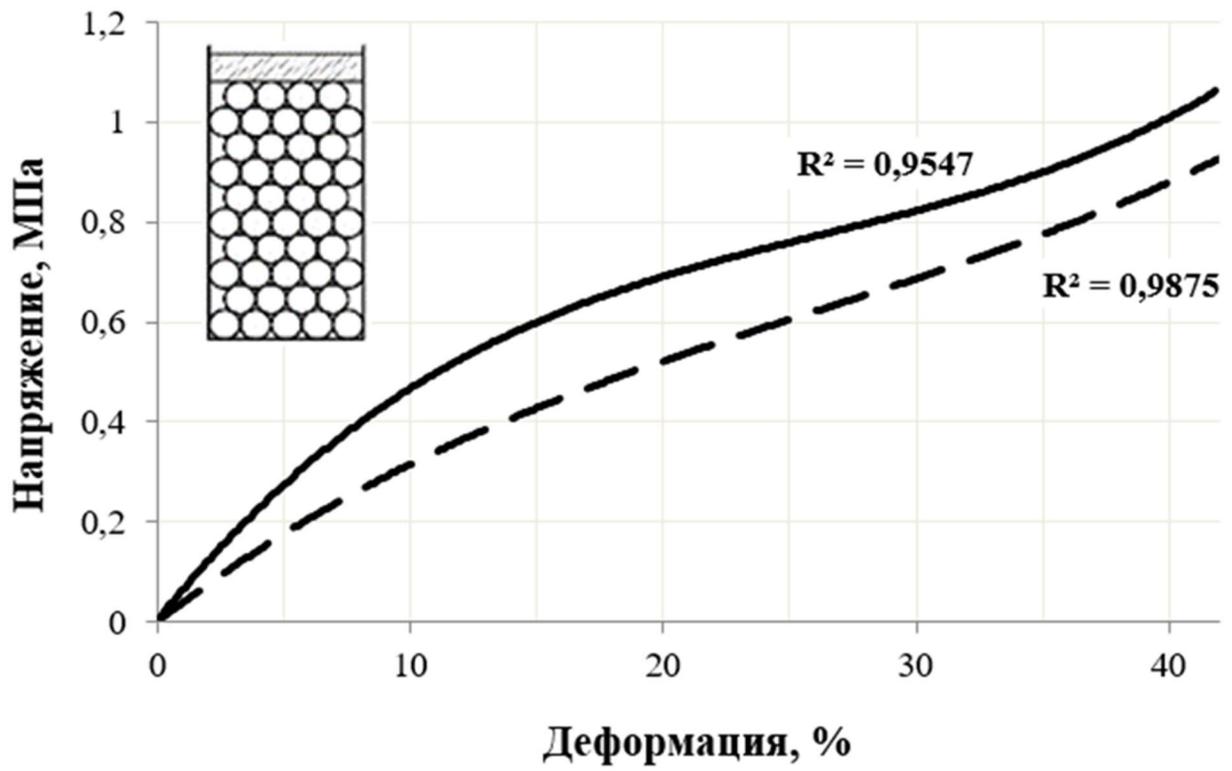
вок. Сплошными линиями обозначены экспериментальные зависимости, полученные при скорости перемещения пресс-пуансона 3 мм/с, пунктирными – 0,5 мм/с. R^2 – значения величин достоверности аппроксимации экспериментальных данных.



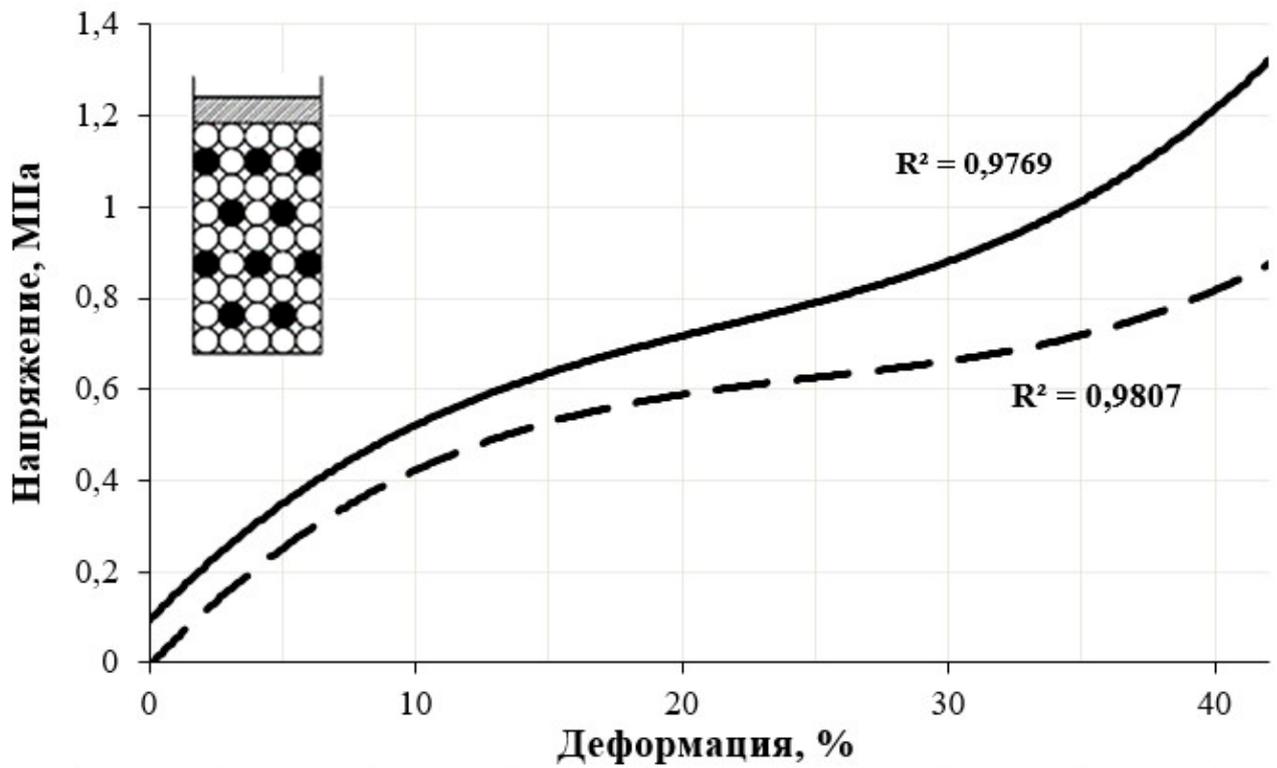
а



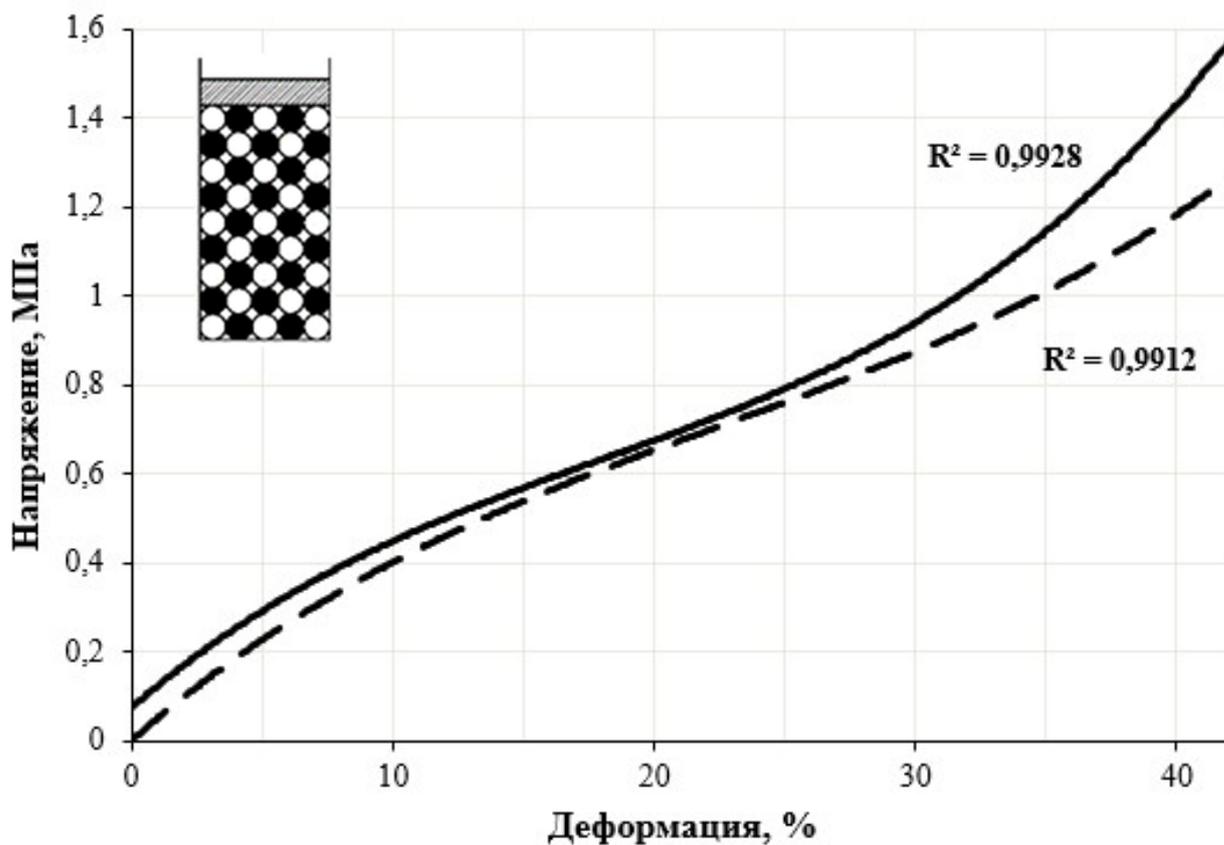
б



В



Г



д

Рисунок 4.1. Полиномиальные зависимости третьего порядка напряжения от деформации: а – свободная засыпка; б – тетрагональная упаковка; в – гексагональная упаковка; г – тетрагональная упаковка с 20 % упругих элементов; д – тетрагональная упаковка с 50 % упругих элементов.

Как видно из рисунка 4.1 максимальные напряжения в конце процесса прессования, соответствующие деформации 42 % и пористости прессовки 10 %, не превышают значения 1,58 для всех вариантов начальной упаковки материала. В таблице 3.2 представлены более подробно средние значения напряжений на траверсе тестовой машины при изменении деформации образца с шагом в 10 %. В таблице символами $\sigma_{0,5}/\sigma_3$ (МПа) обозначены напряжения, полученные при скоростях 0,5 мм/с и 3 мм/с соответственно.

Таблица 4.1. 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

Из рисунка 4.1 и таблицы 4.1 видно, что на начальных этапах процесса прессования разница в значениях напряжений для всех вариантов начальных условий, кроме свободной засыпки шаровидных элементов, менее очевидна. В варианте начальной упаковки «а» напряжения, возникающие при значении деформации 10 % не превышают 0,15 МПа, в то время как для всех других вариантов начальной упаковки частиц эти напряжения находятся в диапазоне от 0,31 МПа до 0,42 МПа. Возможно, это связано с тем, что при свободной засыпке на этой стадии преобладают структурные перемещения элементов по объему прессовки.

Для всех вариантов начальной упаковки вторая стадия прессования начинается при значениях деформации более 10 %. На этом этапе рост напряжений становится менее интенсивным. Скорость перемещения пресс-пуансона начинает оказывать заметное влияние на процесс уплотнения сферических элементов, выполненных из воскообразного материала марки Т1. Для большей скорости прессования характерны большие значения напряжений для всех вариантов начальной упаковки. Однако, в случаях уплотнения однокомпонентного воскообразного материала с вариантами начальной упаковки «б» и «в» в диапазоне значений деформации до 20%, скорость перемещения пресс-пуансона значительного влияния на значения напряжений не оказывает.

При значениях деформации более 30 % наступает третья стадия процесса уплотнения. Изменение напряжений увеличивается, весь объем прессовки испытывает пластическую деформацию. Скорость перемещения пресс-пуансона начинает оказывать существенное влияние на процесс деформирования и рост напряжений. При значениях деформации 40 % наибольшая разница в скоростях перемещения пресс-пуансона соответствует варианту начальной упаковки «д» и составляет 32 %. Возможно, это связано с наличием в уплотняемой композиции не только воскообразного материала, но и более 50 % водорастворимых упругих элементов, что приводит к неравномерному увеличению напряжений в процессе прессования, ввиду сокращения в таких прессовках пространства для деформирования воскообразной составляющей.

Анализируя экспериментальные данные, можно сделать вывод, что основное влияние на процесс уплотнения пористой прессовки оказывает плотность упаковки порошкового воскообразного материала. Из таблиц 2.1 и 4.1, а также рисунка 4.1 видно, что чем выше плотность упаковки, тем выше напряжения необходимые для уплотнения однокомпонентного образца. Для прессовок из порошков, содержащих воскообразный материал и упругие элементы, предназначенные для имитации водорастворимых компонентов, значения напряжений увеличиваются с увеличением процентного содержания таких компонентов. Также очевиден тот факт, что для однокомпонентных воскообразных композиций фронт уплотнения продвигается равномерно в направлении оси приложения нагрузки. В случае уплотнения модельной композиции, содержащих упругие несжимаемые элементы, фронт уплотнения рассеивается, так как эти элементы дополнительно участвуют в «пропрессовке» элементов, выполненных из воскообразного материала. Этот факт приводит к росту напряжений и величины упругого отклика материала прессовки.

Наибольший интерес представляет значение напряжения на стадии завершения процесса уплотнения, соответствующее значению деформации 42 % и пористости прессовки 10%. От этого напряжения во многом зависит процесс релаксации воскообразного материала прессовки, величина упругого отклика и, следовательно, размерно-геометрическая точность итогового пористого прессованного изделия.

Для детального рассмотрения данных значений были построены кривые, характеризующие зависимость напряжений в конце процесса прессования для каждого варианта начальной упаковки элементов от доли объема воскообразных элементов V_d и представленные на рисунке 4.2

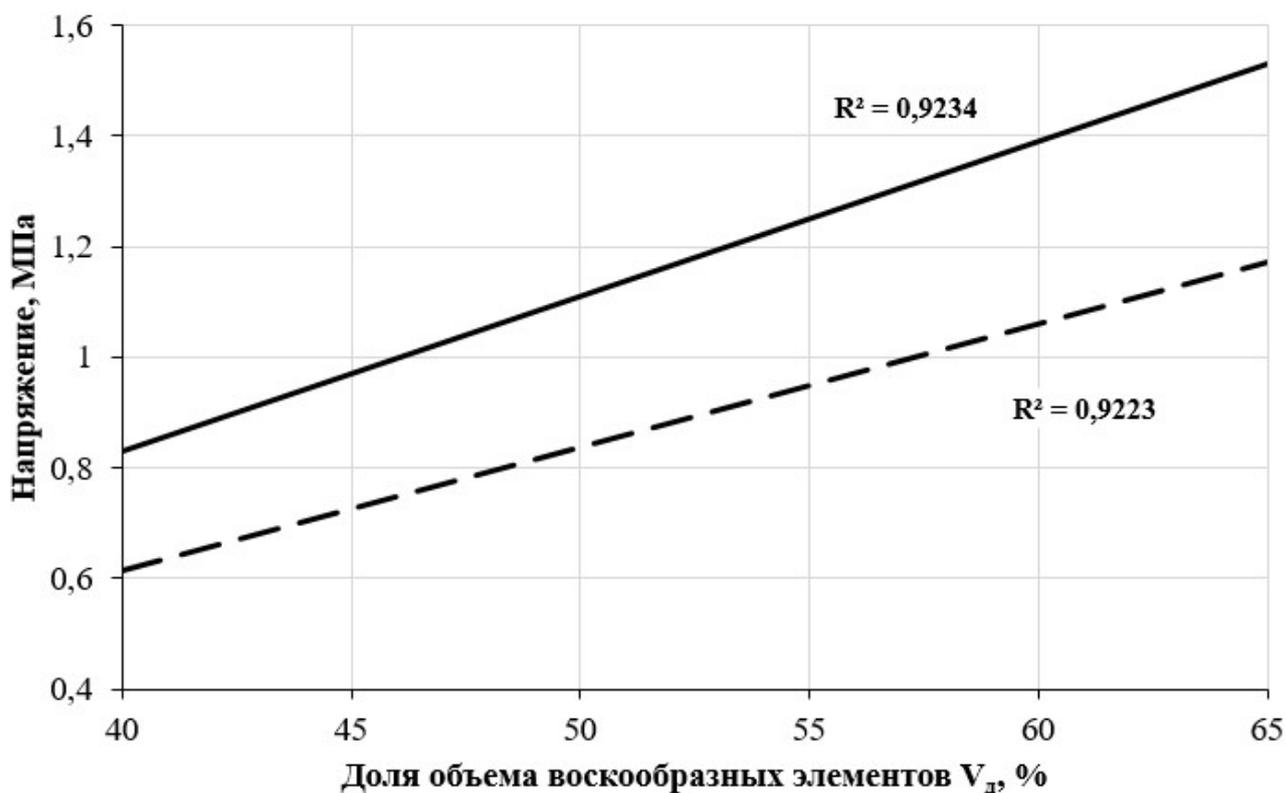


Рисунок 4.2. Зависимость напряжения в конце процесса уплотнения от доли объема воскообразных компонентов.

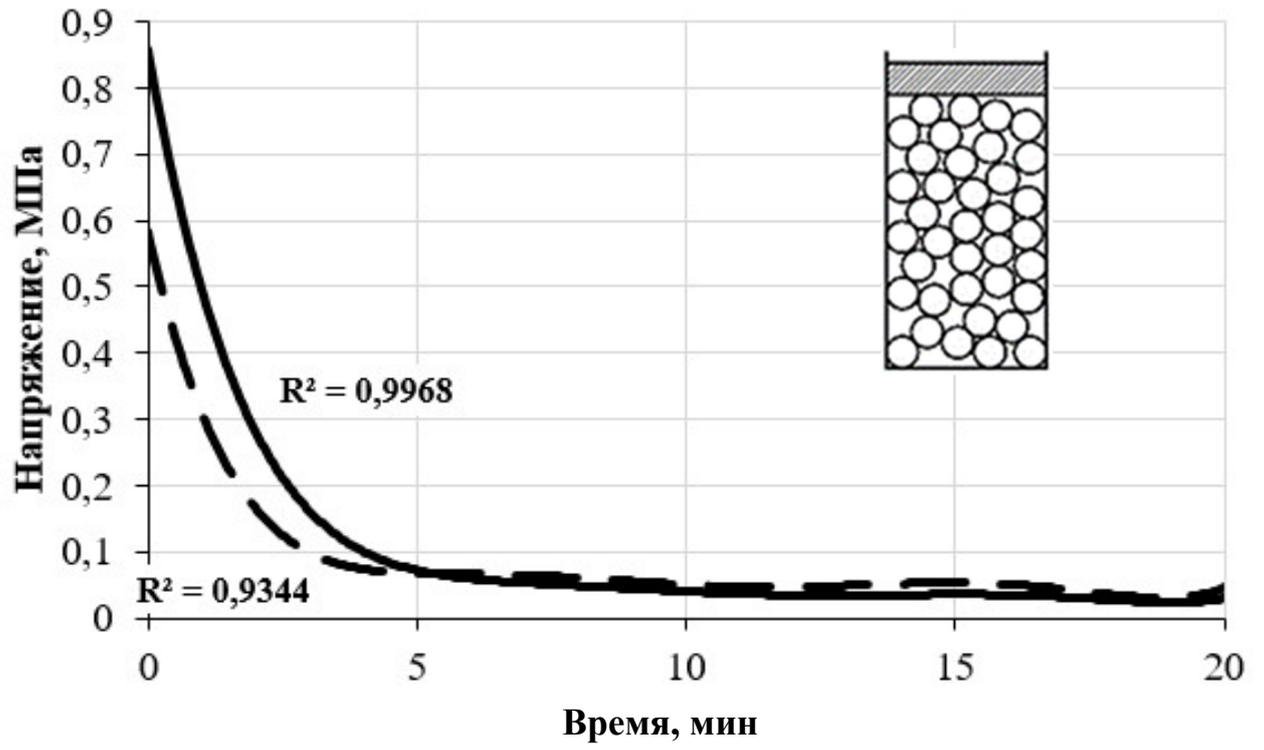
Значения доли объема воскообразных шаровидных элементов в зависимости от начальной упаковки представлено в таблице 2.2. Сплошной линией обозначена кривая, соответствующая скорости перемещения пресс-пуансона 3 мм/с, пунктирной – скорости перемещения пуансона 0,5 мм/с. Символами R^2 обозначены величины аппроксимации экспериментальных данных.

Из рисунка 4.2 видно, что значения напряжений при деформировании в условиях скорости перемещения пресс-пуансона 0,5 мм/с от 28 % до 38 % меньше, чем

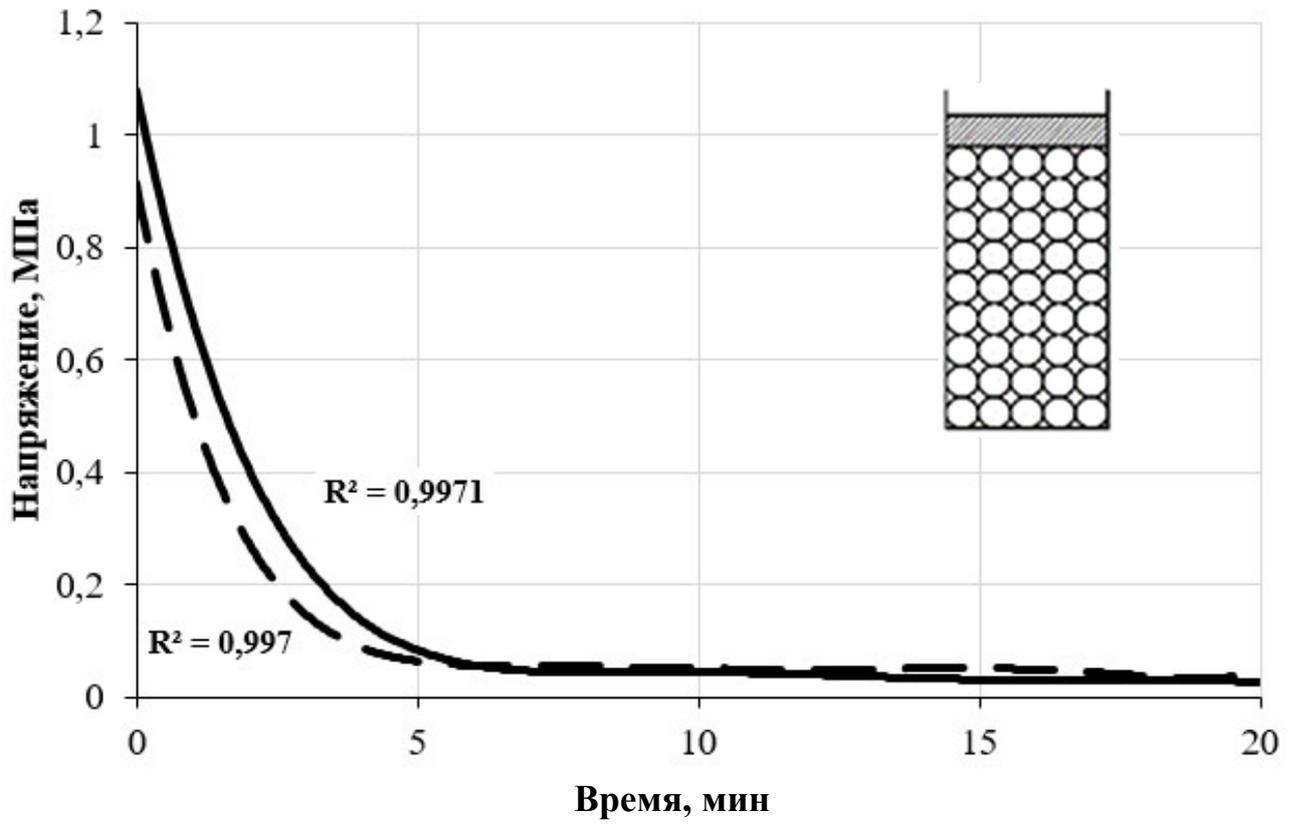
значения напряжений при скорости перемещения пресс-пуансона 3 мм/с. Также заметно, что напряжения при большей скорости деформирования растут быстрее, чем при меньшей скорости. Отсюда следует вывод, что превышение скорости перемещения пресс-пуансона более чем 3 мм/с может привести к неравномерности свойств по объему прессовки, ввиду проявления четко выраженного фронта уплотнения и большего значения упругого отклика.

Предварительными экспериментами установлено, что выдержка уплотненного образца под нагрузкой в значительной степени позволяет снизить упругий отклик прессовки, сформированной из воскообразного модельного материала, за счет релаксации напряжений и выхода стесненного воздуха через зазоры пресс-матрицы. Для минимизации влияния упругого последствия на размерно-геометрическую точность прессовок после уплотнения порошкового воскообразного материала все образцы выдерживались под нагрузкой в течении 20 минут. То есть после уплотнения образца до необходимой пористости 10 % все элементы пресс-матрицы находятся в сомкнутом состоянии, а траверса тестовой машины регистрирует напряжения. Очевидно, что время релаксации напряжений прессовки зависит от значения напряжения в конечной стадии процесса прессования. Чем больше значение напряжения, тем больше необходимо времени на процесс релаксации напряжений.

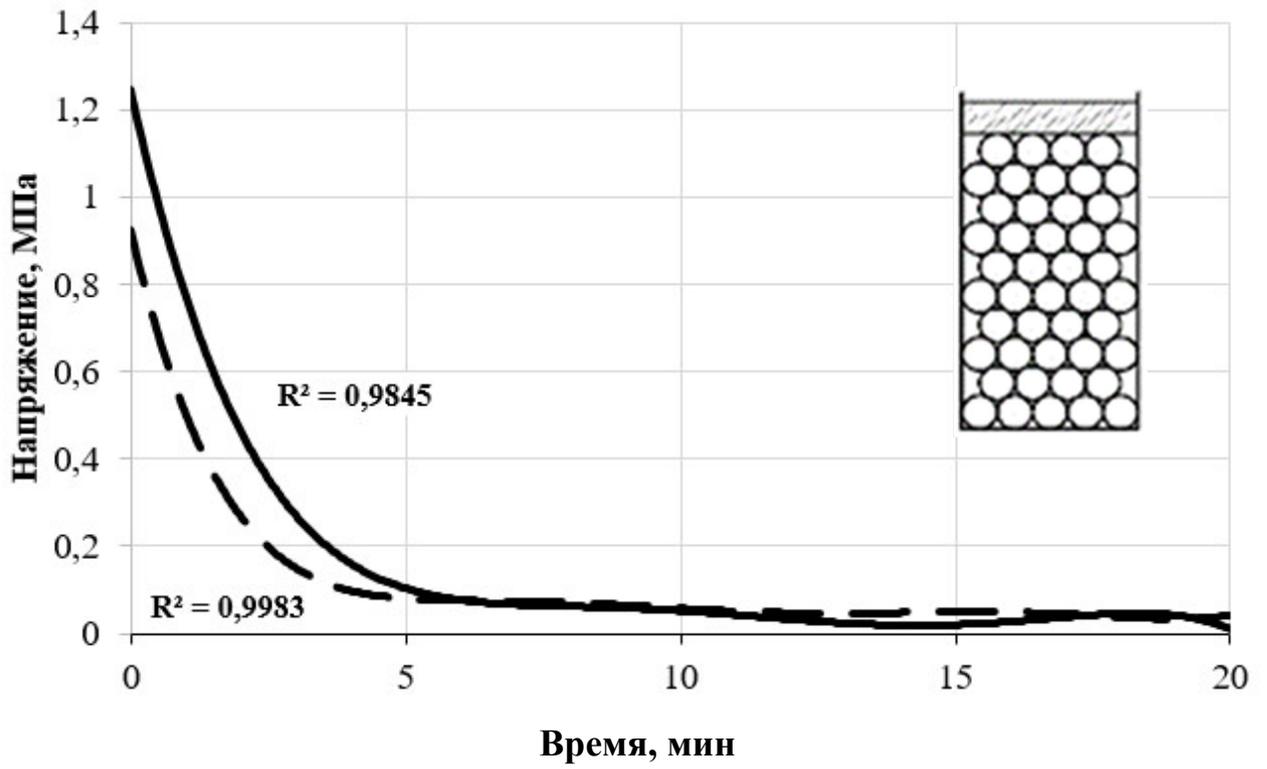
Рисунок 4.3 подтверждает тот факт, что на время релаксации материала прессовки основное влияние имеет величина максимального напряжения, необходимого для уплотнения воскообразной части материала прессовки. Для однокомпонентных композиций снижение напряжений до 90 % происходит уже на 4 -5 минуте. Для композиций, в состав которых входят упругие элементы, данное снижение напряжений достигается на 6-7 минуте.



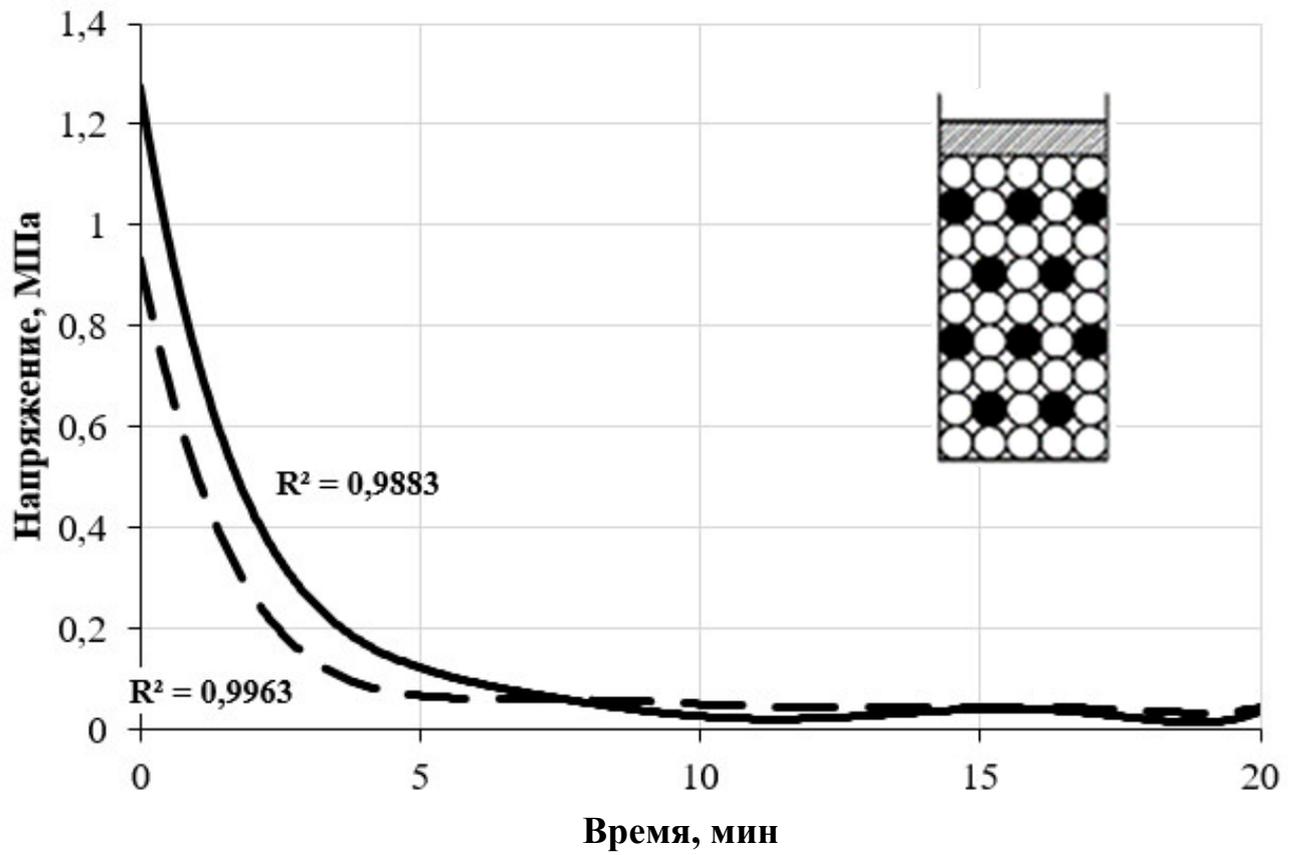
а



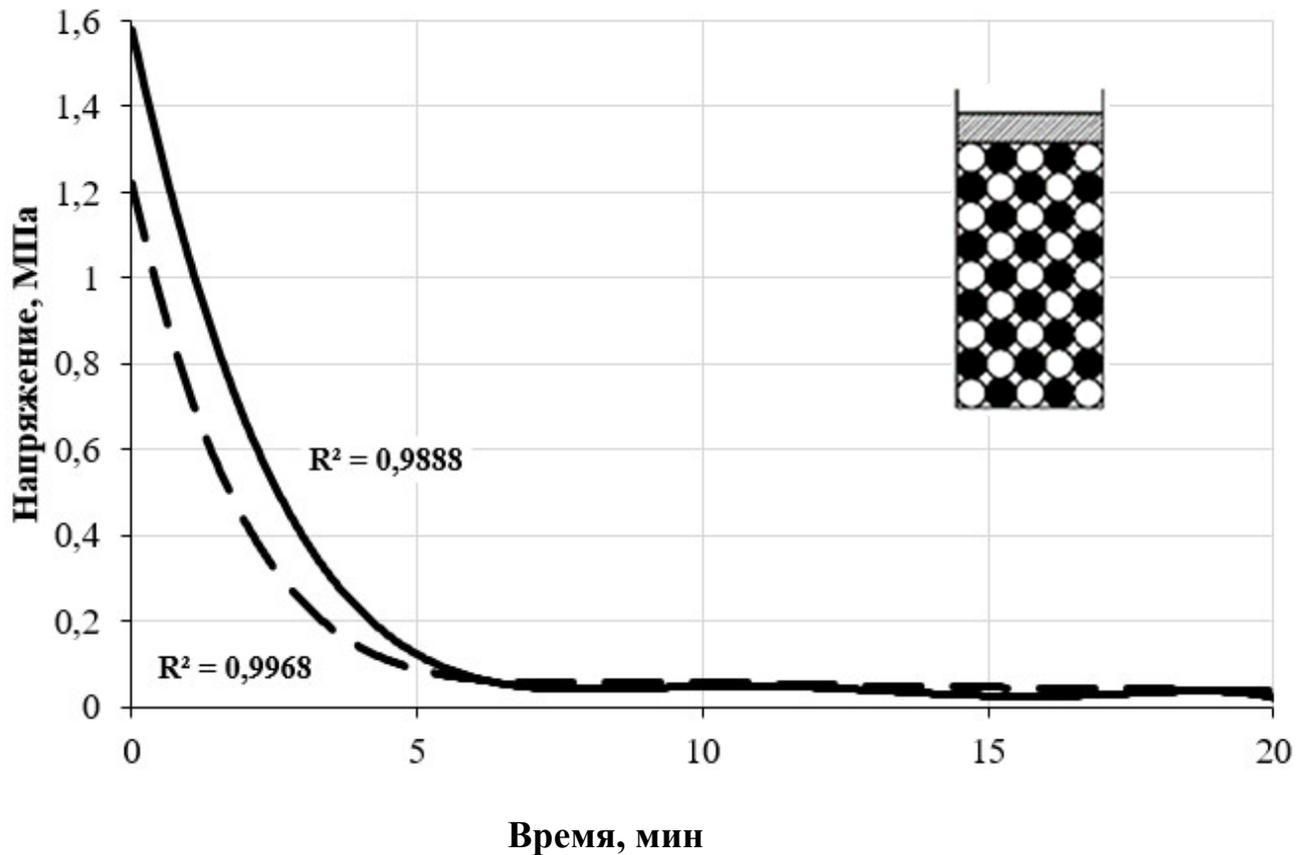
б



В



Г



д

Рисунок 4.3. Зависимость напряжений от времени релаксации материала прессовки: а – свободная засыпка; б – тетрагональная упаковка; в – гексагональная упаковка; г – тетрагональная упаковка с 20 % упругих элементов; д – тетрагональная упаковка с 50 % упругих элементов

На рисунке 4.4 представлен внешний вид прессовки с пористостью 10 %, полученной уплотнением шариков из воскообразного модельного материала марки Т1, после выдержки под нагрузкой в течении 20 минут.

После извлечения прессовок из пресс-матрицы, с помощью цифрового регистратора DIN 863 Vogel, обеспечивающего точность измерения 0,001 мм, определялись реальные размеры образцов. Величина упругого отклика материала рассчитывалась по формуле (4.1):

$$O = ((A_{\text{внутр}} - A_{\text{внеш}}) / A_{\text{внеш}}) \cdot 100\%; \quad (4.1)$$

где O – величина упругого отклика, %; $A_{\text{внутр}}$ и $A_{\text{внеш}}$ – контролируемые размеры внутренней полости пресс-матрицы и внешнего размера прессовки соответственно, мм.



Рисунок 4.4. Внешний вид прессовки с пористостью 10 %, полученной уплотнением шаровидных элементов, выполненных из воскообразного модельного материала

В результате эксперимента определено, что время выдержки под нагрузкой обеспечивает отклонения размеров прессовки относительно соответствующих внутренних размеров пресс-матрицы в интервале значений от 0,01 % до 0,05 %.

Таким образом, из экспериментального исследования можно сделать вывод, что на размерно-геометрическую точность пористых прессовок значительное влияние оказывает начальная упаковка компонентов, скорость деформирования и время выдержки прессовки под нагрузкой.

4.2. Напряженно-деформированное состояние процессов, сопровождающих экструзионное формование

При изготовлении биметаллических отливок получение ряда элементов сложной пространственной конфигурации предполагается посредством формирования поверхности из воскообразного материала на прочном (металлическом) кар-

касе-основе запрессовкой в зазор между формообразующей полостью пресс-матрицы и поверхностью металлического каркаса-основы. В таком случае прогнозирование конечной геометрии прессованной пористой поверхности выплавляемой модели биметаллической отливки становится затруднительным. В этой связи актуальность представляет исследование, направленное на определение влияния различных условий экструзионного формования на распределение свойств в материале прессовки и, как следствие, значение упругого последствия уплотненного материала.

Напряженно-деформированное состояние тела традиционно принято представлять в виде зависимости напряжения, возникающего в материале изменяемой системы, от ее деформации. В случае экструзии воскообразного материала постоянной скорости выдавливания (т.е. когда пресс-матрица выполнена с диффузором, а сам процесс осуществляется в условиях отсутствия внешних источников тепла) для более точной оценки результатов более корректным видится представление зависимости нагрузки, изменяющейся во времени от перемещения пресс-пуансона. Именно усилие прессования является одним из основных параметров, от которого зависят технологические условия процесса, такие как: скорость формоизменения, объем порошкового материала, выбор определенной оснастки и т.д.[105]

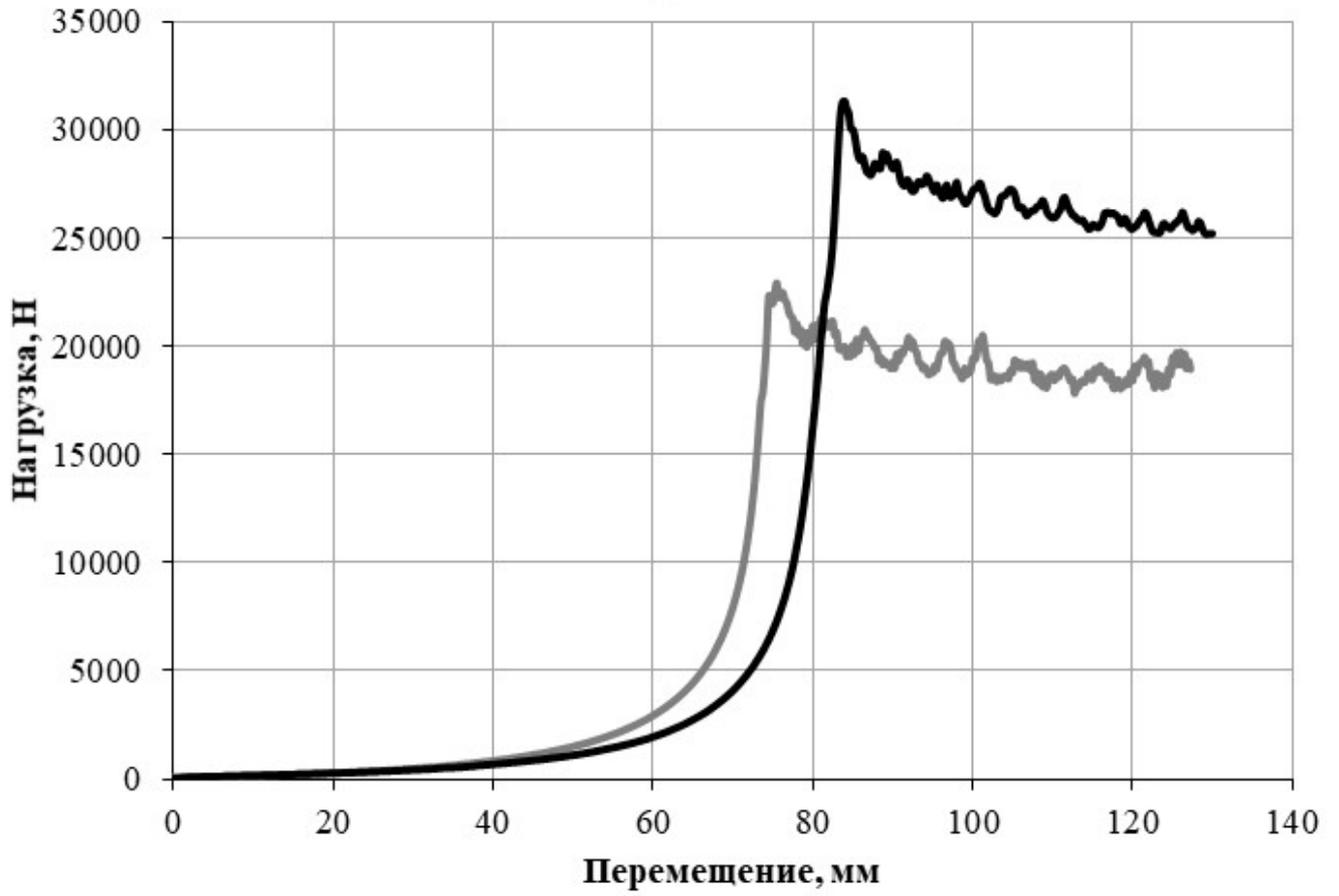
4.2.1. Влияние скорости перемещения пресс-пуансона на значения нагрузок, возникающих в ходе экструзионного формования воскообразных материалов

Основное влияние на величину усилия прессования оказывает скорость перемещения пресс-пуансона и размер фракции порошка воскообразного материала. В ходе экспериментального исследования осуществлялась видеофиксация процесса экструзионного формования длинномерного образца, формируемого на выходе из калибрующего отверстия пресс-матрицы. По кадрам видеофайлов определялась скорость истечения уплотненного воскообразного материала из мундштука. Таким образом, скорости перемещения пресс-пуансона 0,25 мм/с соответствует скорость истечения 6 мм/с, скорости 0,5 мм/с – 12 мм/с и скорости 1,5 мм/с – 36

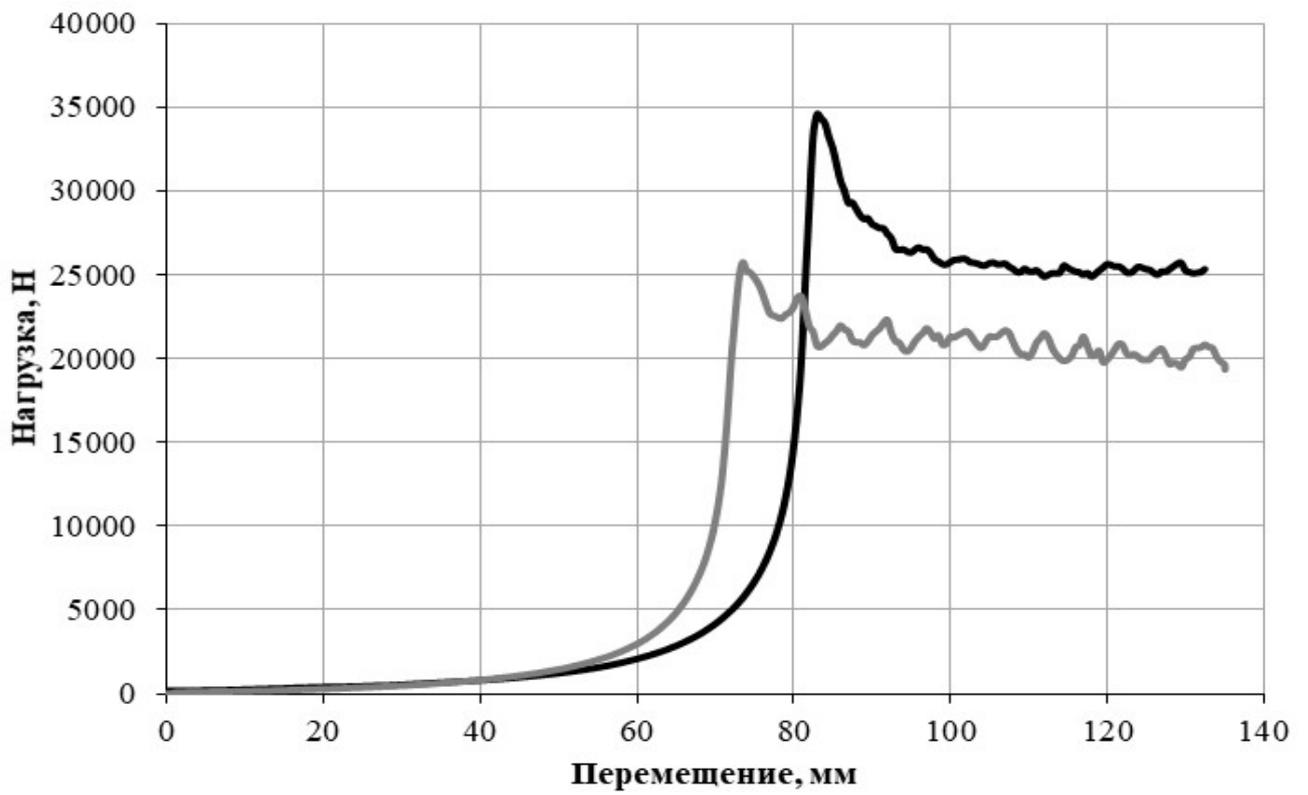
мм/с. На рисунке 4.5 представлены зависимости нагрузки, считываемой на траверсе тестовой машины, от перемещения пресс-пуансона для различных условий прессования при затрудненных условиях, т.е. прессование происходило в прямой пресс-матрице: «а» - скорость экструзии 6 мм/с; вариант «б» - скорость 12 мм/с; вариант «в» - скорость 36 мм/с. Сплошными линиями обозначены зависимости для фракции порошка воскообразного материала марки Т1 – 2,5 мм, пунктирными – для материала фракции 0,63 мм.

Из рисунка 4.5 видно, что тенденция развития зависимости нагрузки от перемещения пресс-пуансона для всех вариантов уплотнения порошка воскообразного материала одинакова. На графиках можно четко разделить стадии процесса экструзии. На первом этапе происходит уплотнение порошка воскообразного материала внутри пресс-матрицы (общая тенденция развития величины нагрузки схожа с прессованием порошка в закрытой пресс-матрице). На втором этапе начинается истечение материала из мундштука. Началу выхода уплотненного воскообразного материала соответствует пиковое значение нагрузки на графике. Дальнейшее истечение материала из пресс-матрицы сопровождается некоторым падением значений усилий (нагрузки) с последующим удержанием их величины на одном уровне. Этап турбулентного истечения материала не входил в задачи данного экспериментального исследования.

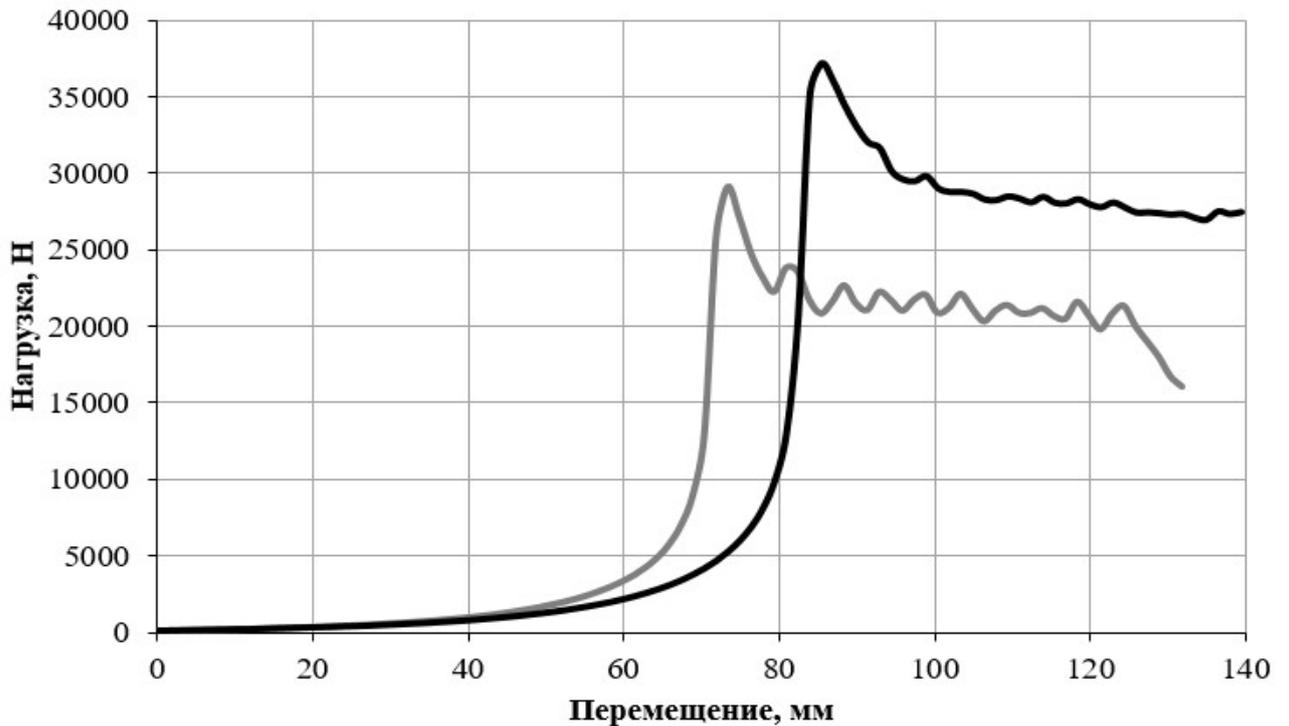
При рассмотрении графиков влияния размера фракции порошка воскообразного материала марки Т1 на величину нагрузки можно сделать вывод, что для более крупной фракции, при всех вариантах прессования, характерны большие значения, чем для мелкой фракции. При скорости прессования 0,25 мм/с увеличение нагрузки для более крупной фракции (относительно меньшей фракции) составляет 40 %. При скорости перемещения пресс-пуансона 0,5 мм/с эта разница составляет 45 %. При скорости 1,5 мм/с – 32 %.



а



б

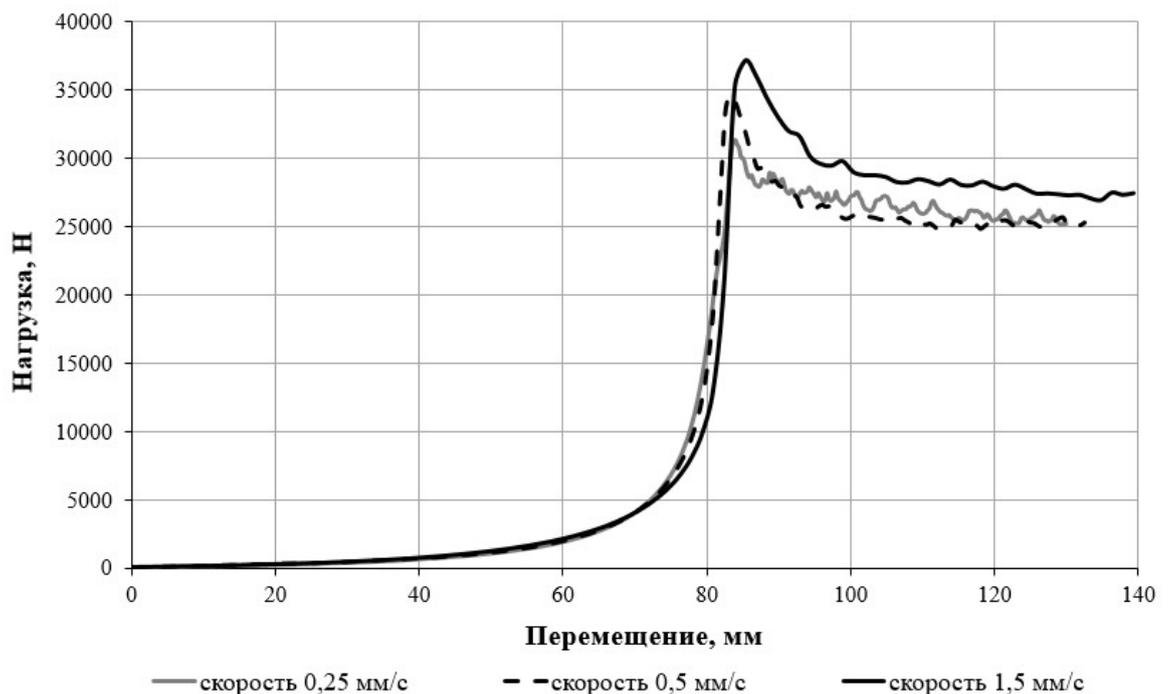


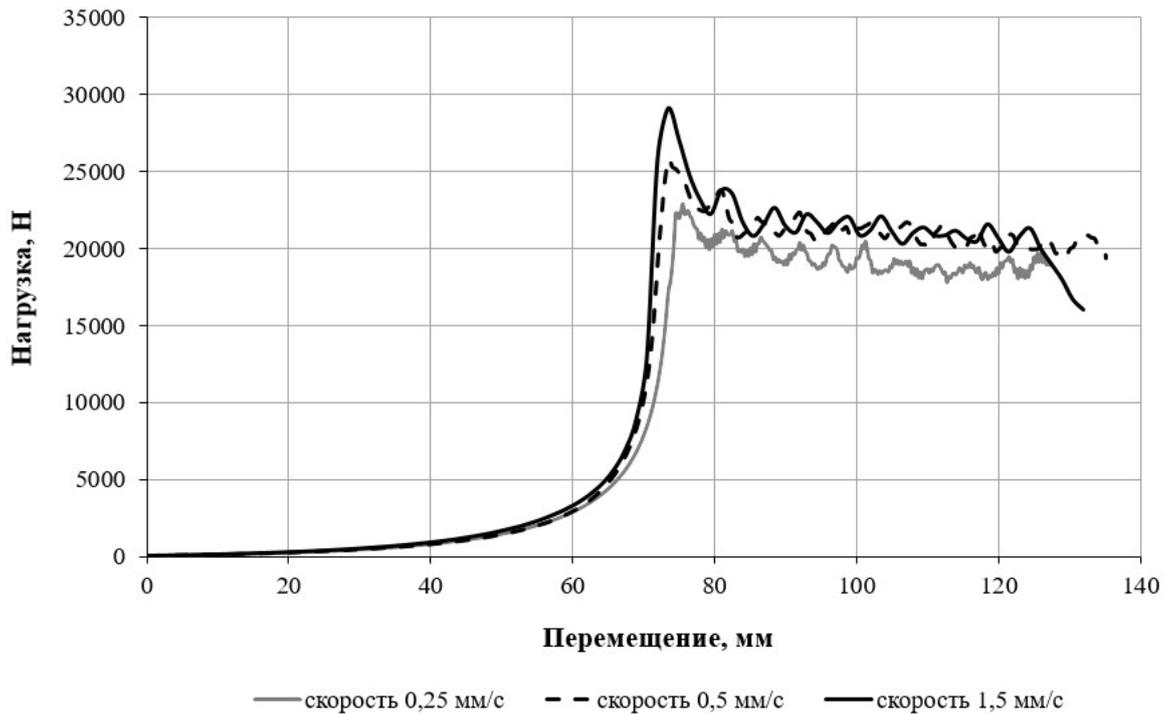
В

Рисунок 4.5. Влияние скорости перемещения пресс-пуансона на величину усилия экструзионного формования

Для более подробного рассмотрения влияния на процесс экструзионного формования скорости перемещения пресс-пуансона полученные зависимости нагрузки расположим на графическом поле для обеих фракций отдельно. На рисунке 4.6.а представлено сравнение зависимостей нагрузки от перемещения пресс-пуансона для процесса прессования порошка воскообразного материала марки Т1 фракции 2,5 мм, рисунок 4.6.б – порошка фракции 0,63 мм. Из рисунка видно, что увеличение скорости перемещения пресс-пуансона приводит к увеличению нагрузки, необходимой для уплотнения порошка воскообразного материала для всех задействованных в эксперименте размеров фракций материала. Значение пиковой нагрузки, соответствующее началу выхода из диффузора длинномерной прессовки из порошка фракции 2,5 мм, для скорости перемещения пресс-пуансона 0,25 мм/с соответствует значению 31 кН. При скорости перемещения пресс-пуансона 0,5 мм/с это значение составляет 34 кН, а при скорости 1,5 мм/с – 37 кН. Для порошка воскообразного материала фракции 0,63 мм значение пиковой нагрузки

при скорости перемещения пресс-пуансона 0,25 мм/с составляет 22,5 кН, при скорости 0,5 мм/с – 25,5 кН, при скорости 1,5 мм/с нагрузка возрастает до 29 кН. Для порошка воскообразного материала фракции 2,5 мм рост значений нагрузки, характеризующих начало выхода длинномерной прессовки из мундштука, относительно скорости 0,25 мм/с при увеличении скорости до 0,5 мм/с составляет около 10 %, при увеличении скорости до 1,5 мм/с – около 19 %. Для порошка воскообразного материала фракции 0,63 мм рост усилий при увеличении скорости перемещения пресс-пуансона до 0,5 мм/с составляет около 13 %, а при скорости 1,5 мм/с – около 29 %. Таким образом, можно сделать вывод, что нагрузки при экструзии порошка воскообразного материала меньшей фракции более подвержены влиянию скорости перемещения пресс-пуансона. При этом разница в величинах нагрузок при выходе на стационарный режим экструдирования не превышает 10 % для всех вариантов экструдирования. Также из рисунка 4.6 видно, что на деформирование порошка внутри пресс-матрицы скорость перемещения пресс-пуансона значительного влияния не имеет. Для порошка воскообразного материала фракции 2,5 мм величина хода, на котором начинается процесс экструдирования составляет около 85 мм, для порошка фракции 0,63 мм это значение соответствует примерно 70 мм.





б

Рисунок 4.6. Влияние скорости перемещения пресс-пуансона на процесс экструдирования порошка воскообразного материала марки Г1.

В результате экспериментальных исследований по влиянию скорости перемещения пресс-пуансона и размера фракции порошка воскообразного материала на теплофизические характеристики процесса экструзии построены степенные аппроксимирующие кривые зависимости температуры уплотняемого материала в зоне контакта диффузора и пресс-матрицы от скорости экструзии. Представленные значения температуры соответствуют значениям пиковой нагрузки, то есть моменту начала выхода материала из диффузора. Данные зависимости представлены на рисунке 4.7. Сплошной линией представлена зависимость для уплотнения порошка воскообразного материала фракции 2,5 мм, пунктирной – порошка фракции 0,63 мм. R^2 – величины достоверности аппроксимации.

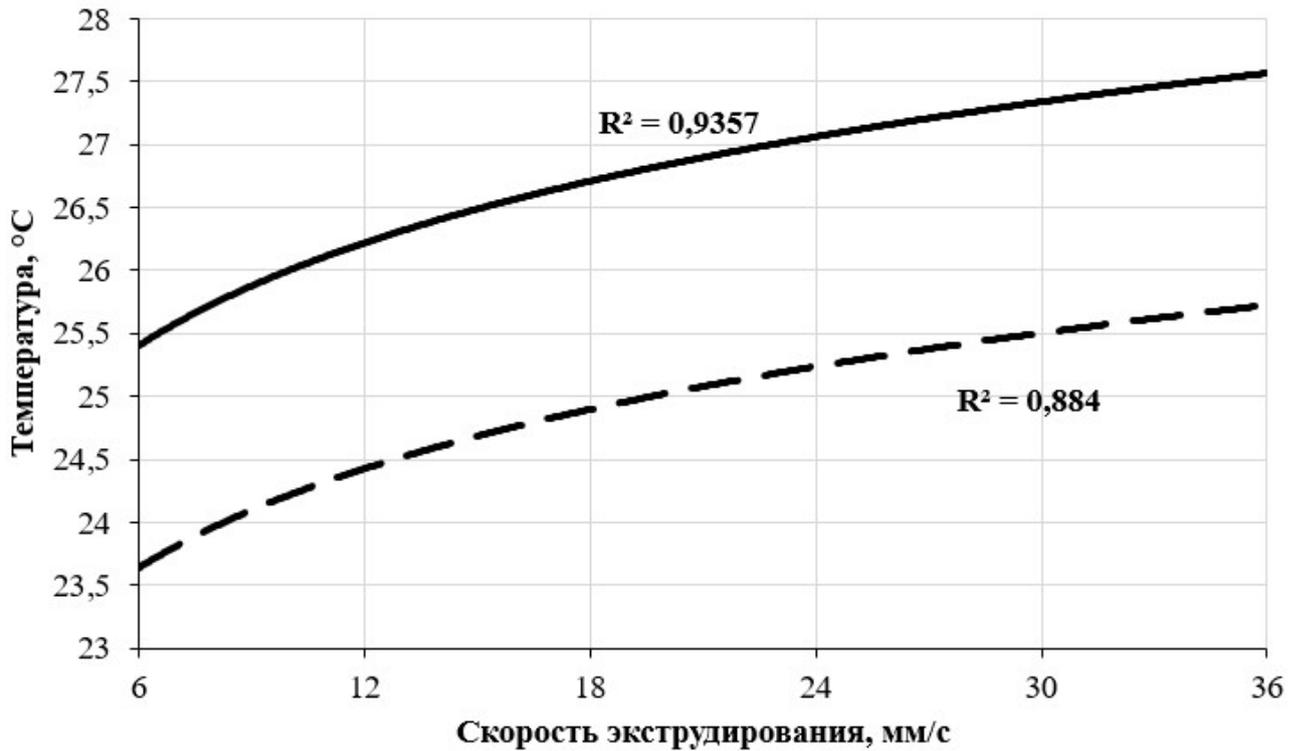


Рисунок 4.7. Зависимости температуры уплотняемого материала в зоне контакта диффузора и пресс-матрицы от скорости экструзии.

Рассмотрев влияние скорости экструзии длинномерной прессовки и, опосредованно, скорости перемещения пресс-пуансона, на значения температуры, можно сделать вывод об увеличении значений температуры с ростом скорости экструзии. Увеличение значений температуры (выраженное в %) в зоне контакта диффузора и пресс-матрицы относительно температуры окружающей среды 20 °C в зависимости от скорости экструзии представлены в таблице 4.2.

Как видно из рисунка 4.7 и таблицы 4.2. температура плавления воскообразного порошкового материала, при экструзии из пресс-матрицы, не достигается, возможно, ввиду высокой теплоемкости материала пресс-матрицы. Это обстоятельство определяет возможность изготовления длинномерных элементов пористых выплавляемых моделей биметаллических отливок высокой размерно-геометрической точности.

Таблица 4.2. Увеличение значений температуры в месте контакта мундштука и пресс-матрицы относительно температуры окружающей среды.

Фракция, мм	Скорость экструзии, мм/с	Увеличение температуры, %
2,5	6	28
	12	29
	36	38
0,63	6	19
	12	20
	36	26

4.2.2. Влияние фракции порошков воскообразных материалов и скорости их экструзии из пресс-матрицы с прямым диффузором на величину упругого отклика длинномерных прессовок

Влияние фракции порошка воскообразного материала и скорости её экструзии из пресс-матрицы на величину упругого отклика длинномерной прессовки представлено на рисунке 4.8. На рисунке 4.8.а представлены зависимости, характерные для порошков воскообразного материала фракции 0,63 мм; на рисунке 4.8,б – для порошков воскообразного материала фракции 2,5 мм. Черная сплошная кривая характеризует величину упругого отклика для длинномерной прессовки, полученной при скорости экструдирования 6 мм/с, черная пунктирная – 12 мм/с, серая сплошная – 36 мм/с. Представленные кривые являются аппроксимацией экспериментальных данных, полученных измерением средних размеров поперечного сечения длинномерной прессовки по длине с шагом 50 мм.

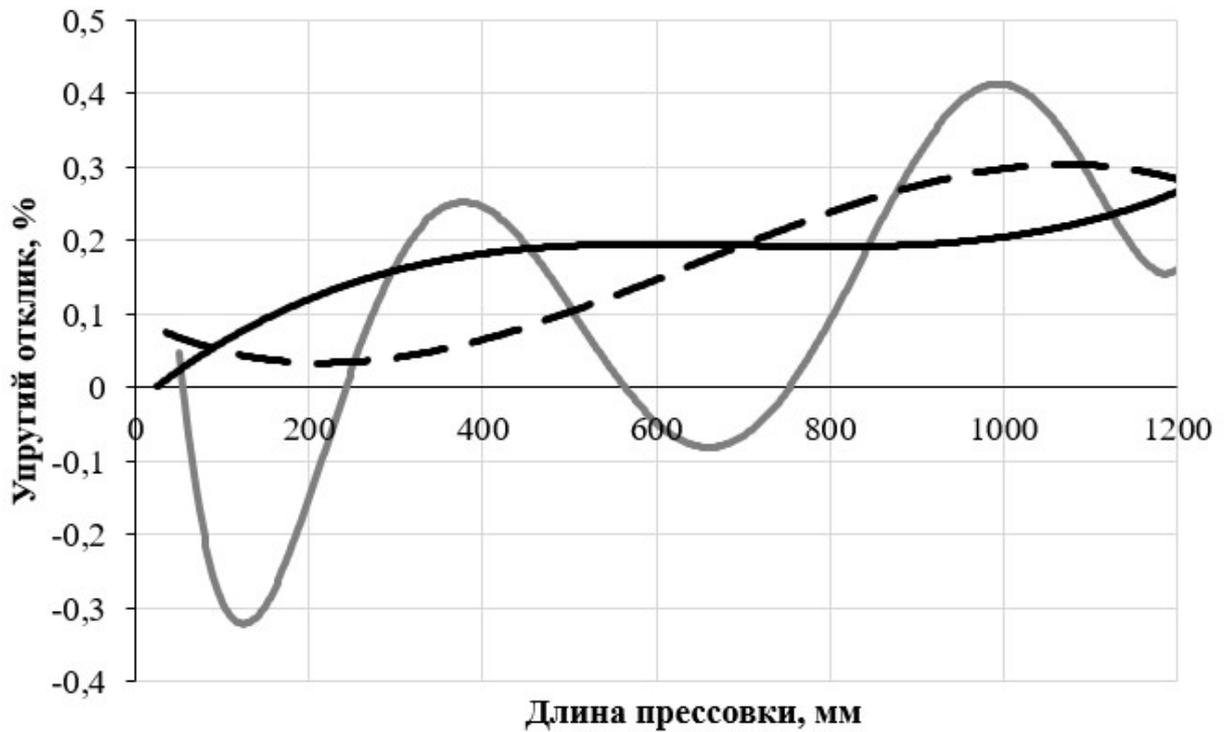
Как видно из рисунка 4.8 скорость перемещения пресс-пуансона оказывает более существенное влияние на величину упругого отклика материала прессовки, чем размер частиц порошка воскообразного материала. Для длинномерных прессовок, полученных при скорости экструдирования 6 мм/с из порошка воскообразной

модельной композиции фракции 0,63 мм величина упругого отклика превышает значение 0,2 % лишь в конце процесса экструзии, для фракции 2,5 мм – величина упругого отклика не превышает 0,3 %.

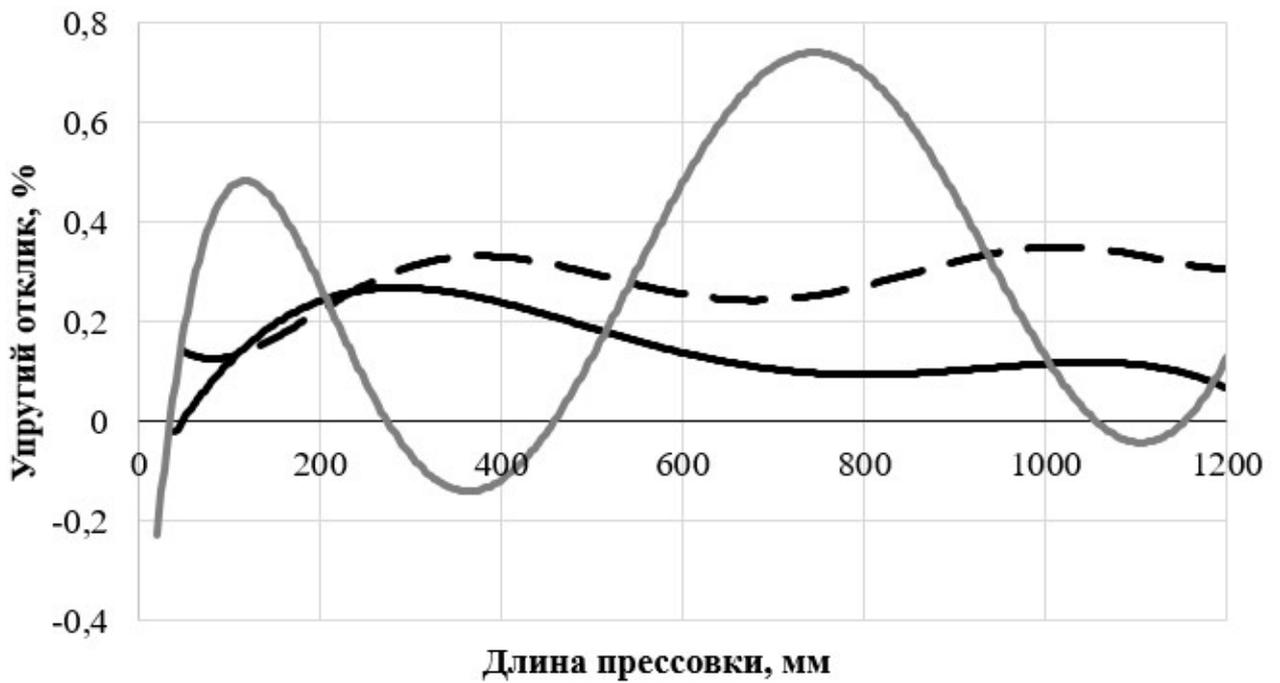
Величина упругого отклика для образцов, полученных при скорости экструзии 12 мм/с незначительно превышает значения упругого отклика, полученные при скорости экструзии 6 мм/с. В целом же, тенденция распределения значений упругого отклика материала по длине прессовок схожа для образцов, изготовленных при отмеченных выше скоростях прессования для разных фракций соответственно. Для прессовок, изготовленных из порошка воскообразного материала фракции 0,63 мм, величина упругого отклика материала по длине прессовки не превышает значения 0,3 %, для прессовок из порошка фракции 2,5 мм – не превышает 0,38 %.

В образцах, полученных при скорости экструзии 36 мм/с, наблюдаются дефекты, связанные с неравномерностью распределения материала по объему прессовки, что подтверждается графиками. Возможно, это происходит в результате нагрева воскообразного материала во время процесса экструзионного формования, до температуры, близкой к точке плавления, что вызывает усадочные дефекты по длине образца. Максимальная величина упругого отклика характерна для прессовок, изготовленных из порошка воскообразного материала фракции 2,5 мм и составляет 0,72 %, максимальная величина усадки материала от заданных размеров прессовки характерна для образца, полученного из порошка воскообразного материала фракции 0,63 мм и составляет 0,32 % от заданных размеров поперечного сечения прессовки.

Как видно из рисунка 4.8 значения упругого отклика прессовок, полученных из порошка воскообразного материала фракции 2,5 мм, превышают значения упругого отклика для прессовок, полученных из порошка фракции 0,63 мм, в среднем на 10 % – 20 %.



а



б

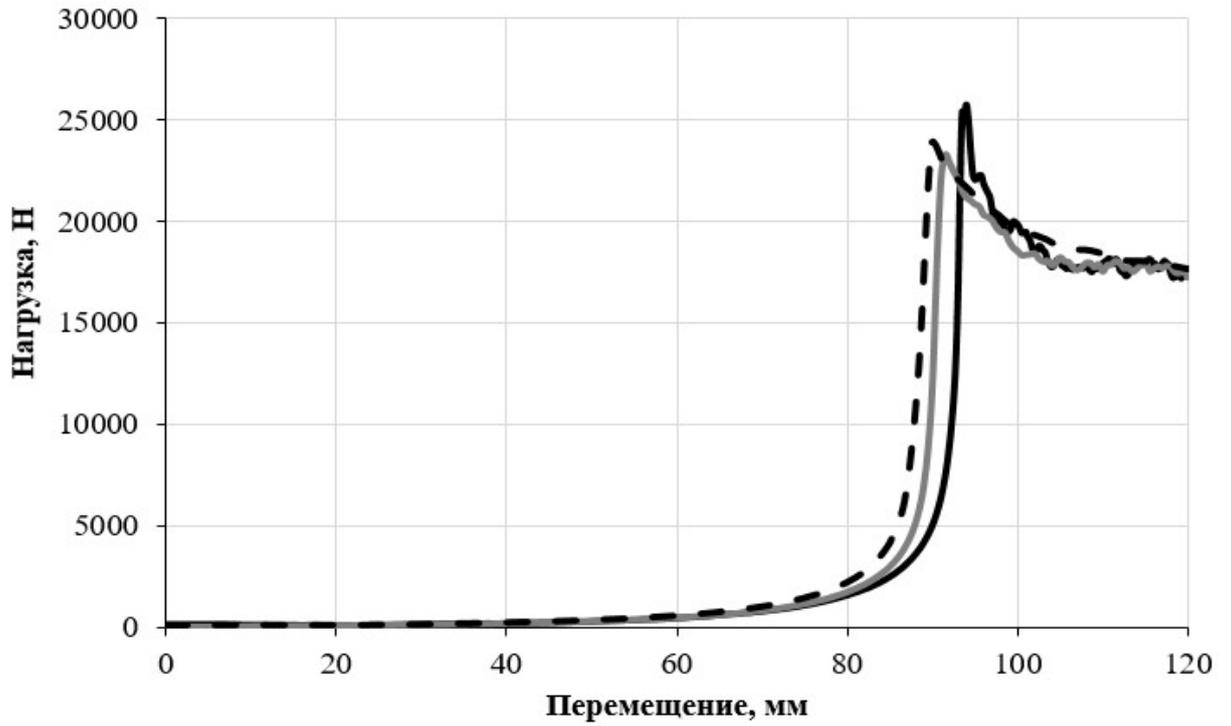
Рисунок 4.8. Распределение упругого отклика по длине прессовок, формируемых из порошков воскообразного материала марки Т1 фракций:

а – 0,63 мм; б – 2,5 мм.

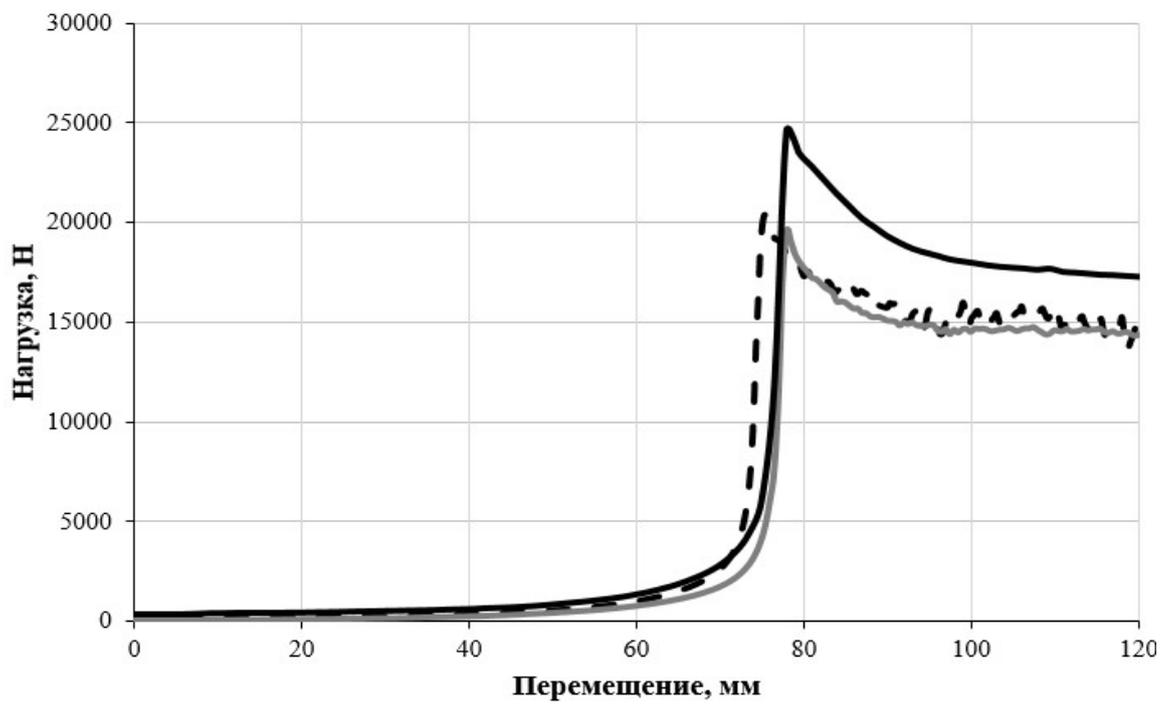
Можно сделать вывод, что наименьшие значения упругого отклика характерны для длинномерных прессовок, полученных при интервале скорости перемещения пресс-пуансона 0,25 мм/с – 0,5 мм/с. Повышение скорости перемещения пресс-пуансона при экструзии приводит к неоднородности распределения свойств прессовки по ее длине, увеличению отклонения от заданных размеров образца, что в производственных условиях не дает возможности изготовления длинномерных элементов пористых выплавляемых моделей для высокоточных биметаллических отливок. Таким образом, технологически приемлемой можно считать скорость перемещения пресс-пуансона при экструзии в затрудненных условиях, не превышающей 0,5 мм/с (при указанных в п.2 габаритных размерах пресс-матрицы).

4.2.3. Влияние формы диффузора на величину пиковых нагрузок при экструзии порошков воскообразных материалов

Очевидно, что на величину пиковой нагрузки при экструзионном формовании, помимо скорости перемещения пресс-пуансона и размеров частиц (фракции) порошка воскообразного материала, оказывает влияние и форма диффузора. Для исследования влияния скорости перемещения пресс-пуансона на величину нагрузки при экструзии с использованием конической формы диффузора строились зависимости нагрузки от перемещения для порошковых материалов отдельно для каждой фракции, представленные на рисунке 4.9. Черная сплошная кривая иллюстрирует зависимость, характерную для скорости перемещения пресс-пуансона 1,5 мм/с, черная пунктирная – для скорости 0,5 мм/с, серая сплошная – для скорости 0,25 мм/с соответственно. Сравнив зависимости нагрузки от перемещения пресс-пуансона можно будет сделать вывод о целесообразности использования той или иной формы диффузора при экструзии порошка воскообразного материала.



а



б

Рисунок 4.9. Влияние скорости перемещения пресс-пуансона на процесс экструзии фракций порошка воскообразного материала при использовании конической формы диффузора: а – 2,5 мм; б – 0,63 мм.

Как видно из рисунка 4.9, при экструдировании с использованием конической формы диффузора происходит снижение величины нагрузки по сравнению с затрудненными условиями прессования (когда диффузор представляет собой круглое отверстие, выполненное в донной части пресс-матрицы и имеющее отношение собственного диаметра к внутреннему диаметру пресс-матрицы 1 к 25 и меньше) для материалов обеих фракций. Причем видно, что в данном случае при скоростях перемещения пресс-пуансона 0,25 мм/с и 0,5 мм/с различия в величине нагрузки незначительны и составляют: для фракции 2,5 мм увеличение на 4 %; для фракции 0,63 мм увеличение нагрузки при увеличении скорости прессования – 5 %. При скорости перемещения пресс-пуансона 1,5 мм/с увеличение нагрузки, по сравнению со скоростью 0,25 мм/с составляет: для фракции 2,5 мм – 13 %; для фракции 0,63 мм – 25 %. При сравнении рисунка 4.6 и рисунка 4.9 можно сделать вывод, что при истечении материала из диффузора с конической формой скорость перемещения пресс-пуансона оказывает меньшее влияние на величину пиковой нагрузки.

Таблица 4.3. Изменение величины пиковой нагрузки.

Фракция, мм	Скорость перемещения пресс-пуансона, мм/с	Пиковая нагрузка, Н		Уменьшение значений нагрузки, %
		Прямая форма диффузора	Коническая форма диффузора	
2,5	0,25	31305,47	22763,33	27,3
	0,5	34557,34	23815,71	31,2
	1,5	37209,35	25762,6	30,7
0,63	0,25	22682,51	19573,77	13,7
	0,5	25723,82	20350,26	20,8
	1,5	29060,48	24618,74	15,2

В таблице 4.3 представлено изменение величины пиковой нагрузки при экструзии воскообразного материала марки Т1 из диффузора конической формы в сравнении со значениями пиковой нагрузки при экструзии воскообразного материала из прямого диффузора при разных скоростях перемещения пресс-пуансона.

На величину хода пресс-пуансона, при которой начинается экструзия материала из пресс-матрицы, изменение формы диффузора оказывает незначительное влияние.

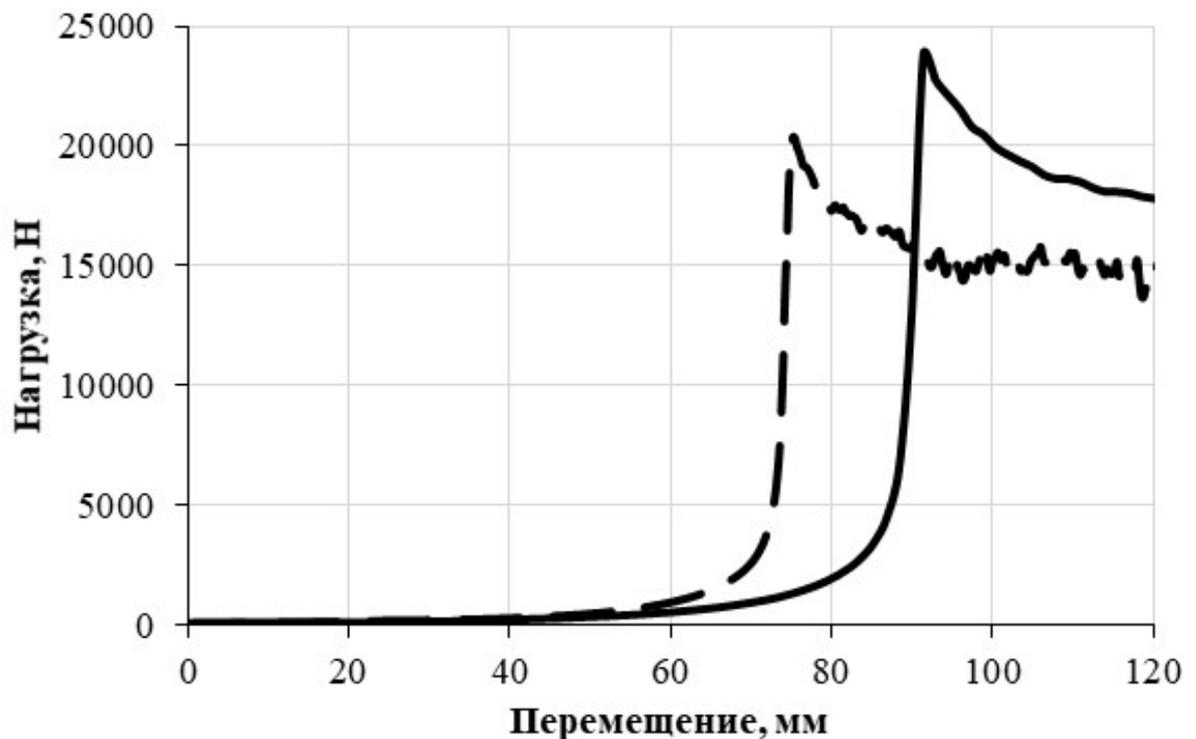


Рисунок 4.10. Зависимость нагрузки (Н) от перемещения пресс-пуансона (мм) при экструдировании порошка воскообразного материала из мундштука с конической формой диффузора.

В результате экспериментального исследования процесса экструзии порошка воскообразного материала из пресс-матрицы с прямой формой диффузора определено, что технологически приемлемая скорость перемещения пресс-пуансона составляет 0,5 мм/с. На рисунке 4.10 представлена зависимость нагрузки от перемещения для процесса экструдирования воскообразного материала из диффузора ко-

нической формы. Сплошной линией обозначена зависимость нагрузки от перемещения для экструзии порошка воскообразного материала фракции 2,5 мм, пунктирной – для материала фракции 0,63 мм.

Из анализа таблицы 4.3 и рисунка 4.10 можно сделать вывод, что для экструзии обеих фракций порошка воскообразного материала, используемого в эксперименте, происходит снижение значений пиковой нагрузки при изменении формы диффузора на коническую. Причем на процесс экструзии порошка воскообразного материала фракции 2,5 мм изменение формы диффузора оказывает большее, чем для экструзии порошка фракции 0,63 мм. При сравнении рисунка 4.10 и рисунка 4.5,б видно, что при конической форме диффузора размер фракции порошка оказывает меньшее влияние на силовые параметры процесса прессования, чем при прямой форме диффузора. На рисунке 4.5,б видно, что при прессовании порошка модельного материала большей фракции, увеличение пиковой нагрузки по сравнению с прессованием порошка меньшей фракции составляет 31,2 %. При экструировании с конической формой диффузора (рисунок 4.10) данное увеличение нагрузки составляет 20,8 %. Таким образом, можно сделать вывод, что для снижения показателей энергосиловых параметров процесса экструзии порошка воскообразного материала предпочтительнее использовать диффузор с конической формой.

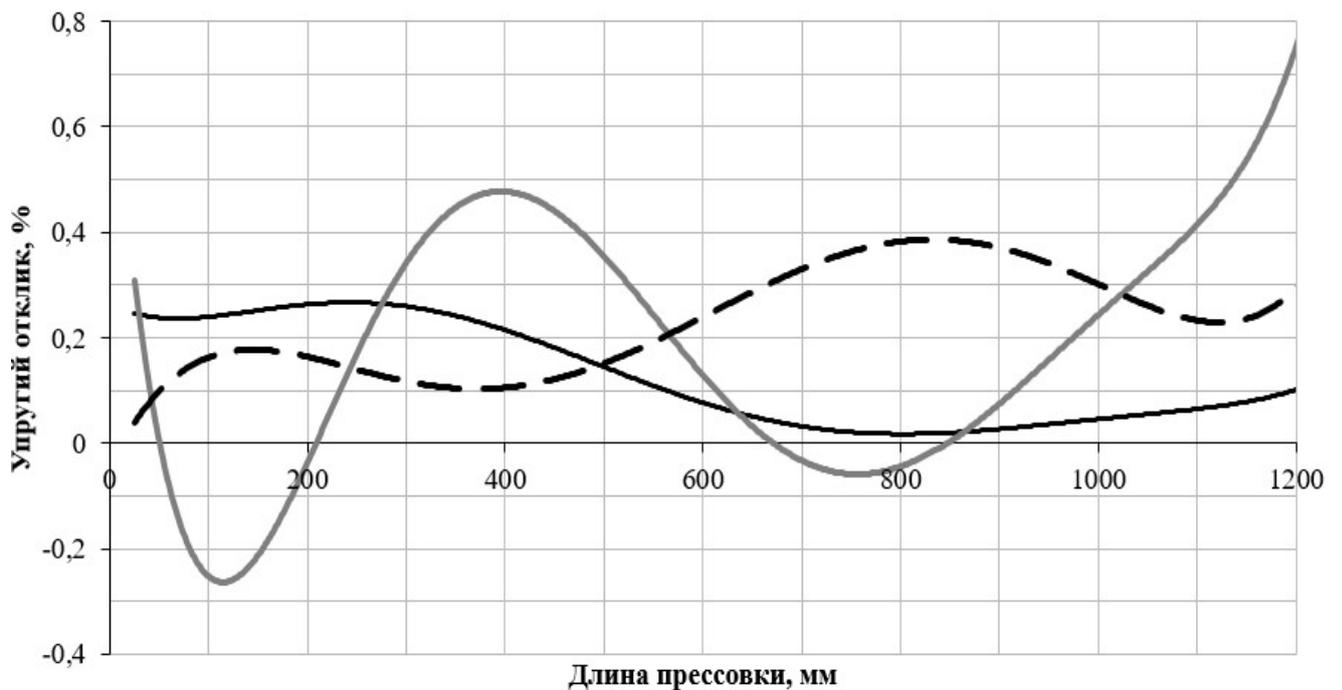
4.2.4. Влияние фракции порошков воскообразных материалов и скорости их экструзии из пресс-матрицы с коническим диффузором на величину упругого отклика длинномерных прессовок

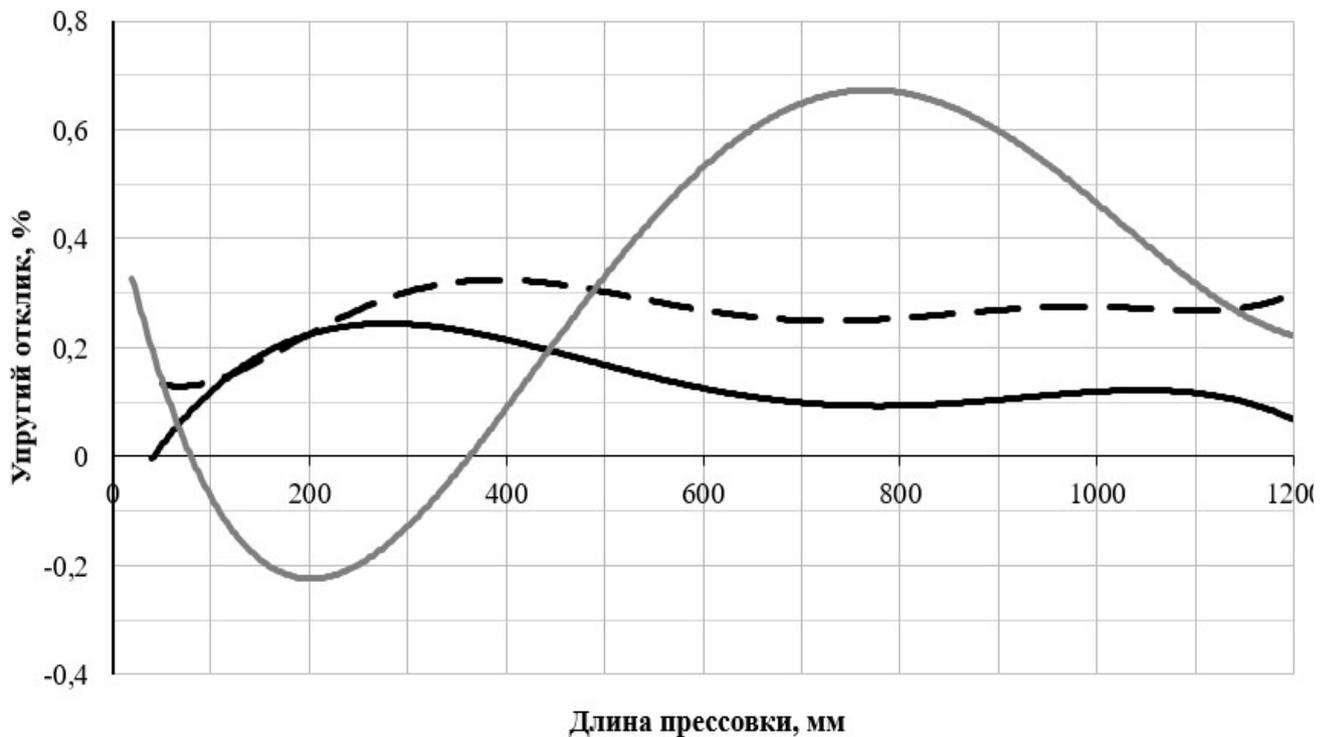
Результаты экспериментального исследования влияния формы диффузора на величину упругого отклика материала длинномерной прессовки представлены на рисунке 4.11.

При рассмотрении рисунка 4.11 видно, что преобладающее влияние на величину отклонения размеров прессовки от диаметра диффузора оказывает скорость

перемещения пресс-пуансона, а, следовательно, и величина нагрузки. Максимальная нагрузка возникает при скорости перемещения пресс-пуансона 1,5 мм/с, что соответствует максимальным отклонениям от горизонтальной оси на графиках, изображенных на рисунке 4.11. Причем помимо упругого последствия материала в рассматриваемых образцах также заметны усадочные зоны, что свидетельствует о недопустимости применения такой скорости перемещения пресс-пуансона при экструзии порошка воскообразного материала.

При меньших скоростях прессования усадочных явлений в материале не наблюдается. Для порошкового материала фракции 2,5 мм при скорости перемещения пресс-пуансона 0,25 мм/с величина упругого отклика не превышает 0,27 %, при скорости 0,5 мм/с – 0,4 %. Для порошкового материала фракции 0,63 мм упругое последствие при скорости 0,25 мм/с не превышает 0,24 %, при скорости прессования 0,5 мм/с – 0,32 %. Эти значения незначительно отличаются от значений упругого отклика при экструзии с использованием пресс-матрицы, снабженной диффузором прямой формы.





б

Рисунок 4.11. Распределение упругого отклика по длине прессовок, выполненных из порошков воскообразного материала, фракций:

а - 2,5 мм; б - 0,63 мм.

В результате экспериментального исследования влияния скорости прессования, размера частиц порошка и формы диффузора на процесс экструзионного формирования порошкового воскообразного материала марки Т1, определены технологические условия формирования длинномерной прессовки с наименьшим отклонением от заданных размеров. Основное влияние на энергосиловые параметры процесса оказывает скорость перемещения пресс-пуансона и форма диффузора. Установлено, что наиболее приемлемая скорость составляет 0,5 мм/с и для производственных условий коническая форма диффузора является предпочтительной. В данном случае не наблюдается усадочных дефектов, величина упругого отклика незначительно отличается от отклонений размеров прессовок, полученных при скорости перемещения пресс-пуансона 0,25 мм/с. Разница в нагрузках при таких условиях также незначительна и составляет 4 % - 5 %.

4.2.5. Влияние соотношения площадей поперечных сечений диффузора и пресс-матрицы при экструзии воскообразных порошковых материалов

В предыдущем разделе рассматривался процесс экструзионного формования длинномерной прессовки с плотностью близкой к плотности воскообразного материала марки Т1 в литом состоянии, т.е. 860 кг/м^3 . Для получения пористых длинномерных элементов выплавляемой модели проводилось экспериментальное исследование влияния соотношения площадей поперечных сечений пресс-матрицы и диффузора на плотность получаемых образцов.

В результате экспериментального исследования получены экспоненциальные зависимости нагрузки, регистрируемой на пресс-пуансоне, от отношения площадей поперечных сечений пресс-матрицы и диффузора в интервале от $1/60$ до $1/5$. Данные зависимости представлены на рисунке 4.12. Сплошной линией обозначена зависимость, соответствующая прессованию порошка воскообразного материала фракции 2,5 мм, пунктирной линией – порошка фракции 0,63 мм. R^2 – величина достоверности аппроксимации экспериментальных данных.

Из рисунка 4.12 видно, что с увеличением значений соотношения площадей поперечных сечений выходного отверстия и внутреннего диаметра пресс-матрицы значения пиковой нагрузки, соответствующей началу истечения воскообразного материала из пресс-матрицы, убывают. При этом нагрузка, соответствующая процессу экструзии порошкового материала более крупной фракции, превышает значения нагрузки для прессования материала, представленного фракцией меньшего размера. С увеличением соотношения рассматриваемых площадей разница в значениях нагрузки увеличивается. Для длинномерной прессовки диаметром 20 мм, при соотношении площадей 0,18, соответствует максимальная разница в значениях нагрузки при изменении размера частиц порошка. В данном случае при увеличении фракции порошка воскообразного материала происходит рост нагрузки на 37 %.

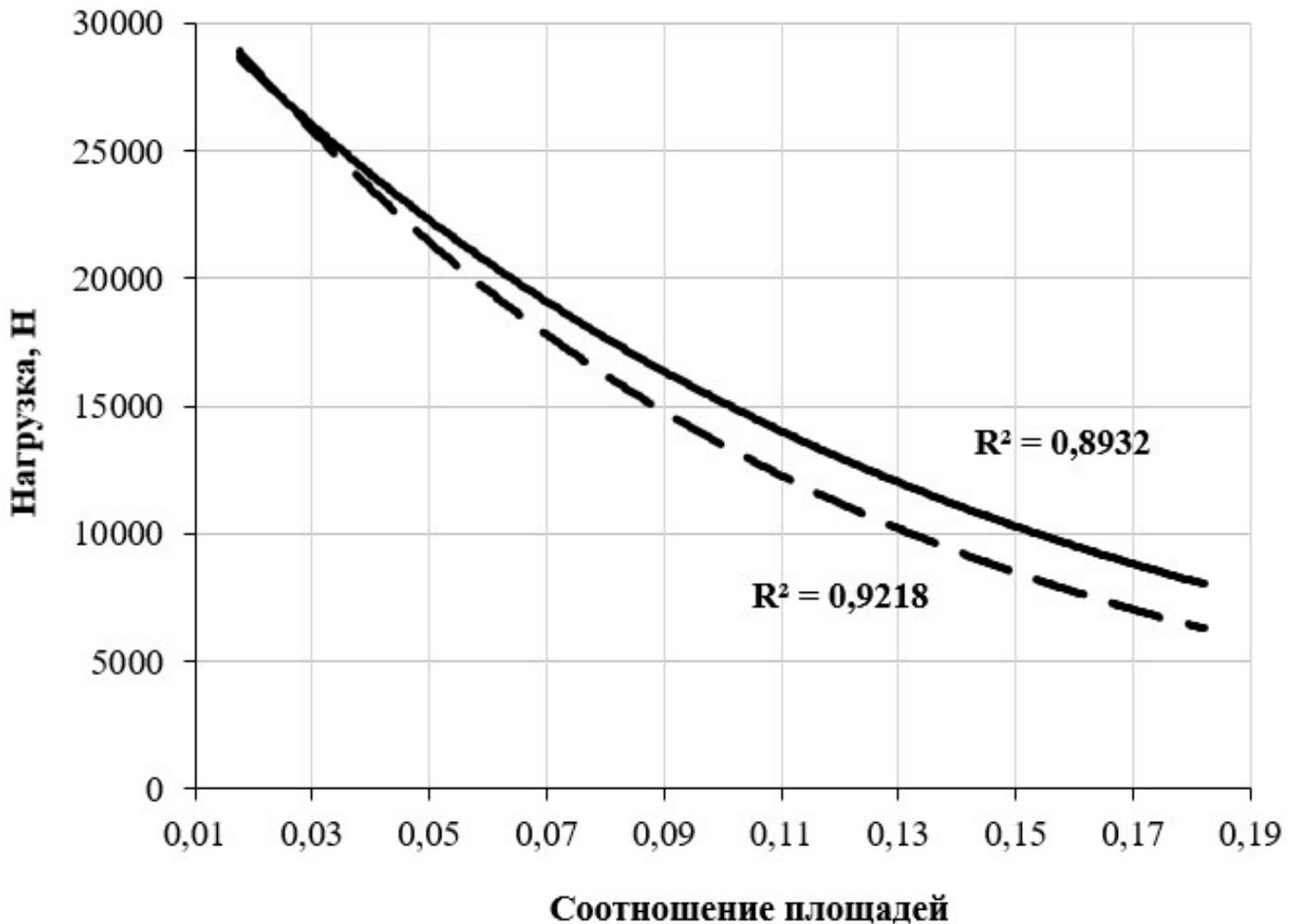


Рисунок 4.12. Экспоненциальные зависимости пиковой нагрузки от соотношения площадей поперечных сечений пресс-матрицы и диффузора.

В результате экспериментального исследования влияния соотношения площадей поперечного сечения диффузора и внутреннего диаметра пресс-матрицы на плотность длинномерной прессовки построены экспоненциальные зависимости, представленные на рисунке 4.13. Сплошной линией обозначена зависимость, характерная для порошка воскообразного материала фракции 2,5 мм, пунктирной – для материала фракции 0,63 мм. R^2 – величины достоверности аппроксимации экспериментальных данных.

Из рисунка 4.13 видно, что с увеличением соотношения площадей плотность длинномерной прессовки уменьшается. При соотношении площадей менее значе-

ния 0,025, плотности образцов, изготовленных из порошков разных фракций, совпадают и близки к плотности материала, соответствующей плотности парафина марки Т1 при свободной заливке. При соотношении площадей менее 0,022 заметно переуплотнение материала, что приводит к усадочным дефектам. С увеличением соотношения площадей поперечных сечений плотность длинномерных прессовок, полученных из порошка фракции 0,63 мм убывает более интенсивно, чем у прессовок, полученных из порошка фракции 2,5 мм. Таким образом, для образцов с диаметром поперечного сечения 14 мм при уменьшении фракции порошка плотность уменьшается на 0,8 %.

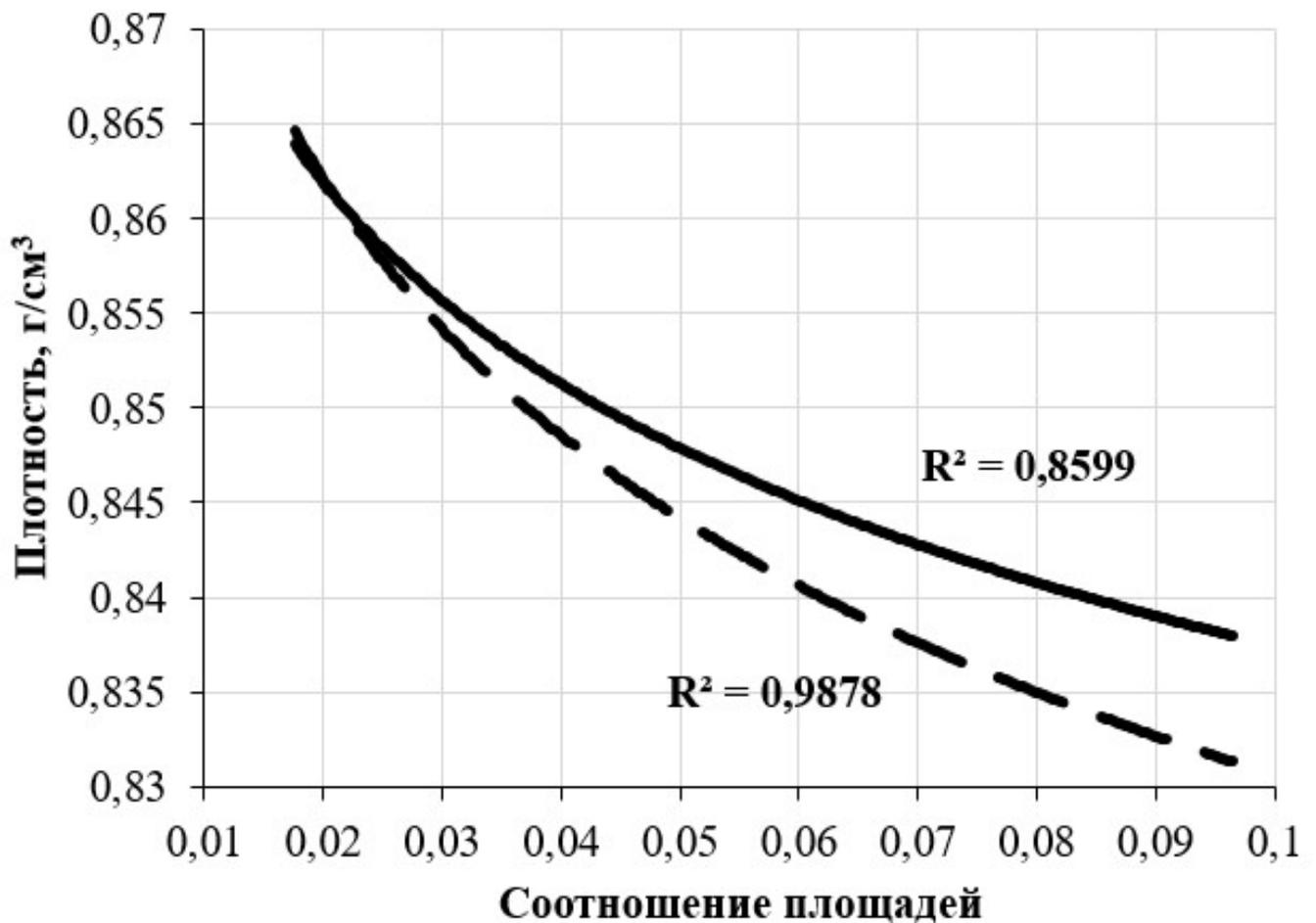


Рисунок 4.13. Экспоненциальные зависимости плотности прессовок от соотношения площадей поперечных сечений пресс-матрицы и диффузора.

При увеличении соотношения площадей поперечных сечений пресс-матрицы и диффузора более 0,1, появляются поверхностные дефекты прессовки, характерные для недоуплотнения порошковых материалов.

Таким образом, можно сделать вывод, что для формирования бездефектной тонкостенной длинномерной поверхности выплавляемой модели биметаллической отливки соотношение площадей поперечных сечений пресс-матрицы и диффузора для воскообразного материала марки Т1, должно находиться в интервале от 0,025 до 0,1. При этом пористость, получаемой прессовки не превышает 5 %.

4.3. Выводы

1. Установлено, что при моделировании формирования тонкого слоя на каркасе-основе путем уплотнения воскообразных сферических элементов в закрытой пресс-матрице для однокомпонентных систем значения напряжений регулируются скоростью перемещения пресс-пуансона и плотностью упаковки порошкового материала. Чем плотнее упакован порошковый материал и выше скорость деформирования, тем выше значения напряжений, необходимых для формирования пористой прессовки уплотнением составляющих ее компонентов. Для прессовок с содержанием упругих недеформируемых элементов основное влияние оказывает не насыпная плотность, а процент содержания таких элементов в объеме прессовки. Так при увеличении содержания упругих элементов в объеме порошкового тела происходит увеличение значений напряжений, что в свою очередь ведет к увеличению значений упругого отклика и неравномерности распределения свойств прессовки, сформированной из материала на воскообразной основе.

2. Установлено, что при получении длинномерных пористых элементов выплавляемых моделей путем экструдирования основное влияние на рост значений усилий, необходимых для прессования, оказывает увеличение скорости перемещения пресс-пуансона и фракции порошкового материала.

3. Определено, что технологически приемлемая скорость перемещения пресс-пуансона составляет 0,5 мм/с. Увеличение скорости до 1,5 мм/с приводит к

значительному росту пиковой нагрузки, характерной для момента начала экструдирования воскообразного материала, и неравномерному распределению его свойств в объеме прессовки. Это, в свою очередь, приводит к поверхностным дефектам, соответствующим усадке и увеличению упругого последствия материала.

4. При моделировании процесса экструзии порошковых воскообразных материалов установлена предпочтительность использования диффузора конической формы. В таком случае происходит снижение пиковой нагрузки и уменьшение значений упругого отклика уплотненного материала.

5. Для получения бездефектных тонкостенных длинномерных пористых элементов выплавляемой модели биметаллической отливки высокой размерно-геометрической точности, соотношение площадей поперечных сечений внутренней полости пресс-матрицы и диффузора должно находиться в диапазоне значений от 0,025 до 0,1, при этом пористость элемента не будет превышать 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 предустановленные 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 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sata, A. Bayesian inference-based investment-casting defect analysis system for industrial application / A. Sata, B. Ravi // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* – 2017. – Т. 90 (9-12). – С. 3301–3315.
2. Rodriguez, A. Maximal reduction of steps for iron casting one-of-a-kind parts / A. Rodriguez, A. L.N.L. de Lacalle, A. Calleja, A. Fernández, A. Lamikiz // *Journal of Cleaner Production* – Т. 24. – С. 48–55.
3. Литье по выплавляемым моделям / Гаранин В.Ф. [и др.]; Под общ. ред. Озерова В.А. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1994. – 448 с.
4. Zhilin S.G. Decrease in the elastic response in compacting a paraffin–stearin powder composition / S.G. Zhilin, N.A. Bogdanova, O.N. Komarov, A.A. Sosnin // *Russian metallurgy (metally)* – 2021. – № 4. – С. 459 - 463.
5. Эльцуфин, С. А. Литье повышенной точности / С. А. Эльцуфин / под общ. ред. А.М. Липницкого. – Ленинград: Машиностроение, 1981. – 80 с.
6. Иванов, В. Н. Брак и дефекты в литье по выплавляемым моделям / В. Н. Иванов. – М.:Машгиз, 1959. – 72 с.
7. Сушко, Т. Н. Анализ причин брака при производстве стальных корпусных отливок посредством СКМ ЛП LVMFLOW / Т. Н. Сушко, А. С. Леднев, Т. В. Пашнева, И. Г.Руднева // *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова* – 2002. –№ 1. – С. 26–29.
8. Жилин, С. Г. Управление структурой и свойствами пористых комбинированных удаляемых моделей: дис. ...канд.техн. наук: 05.16.04; защищена 16.05.2002 /Жилин Сергей Геннадьевич. 2002. – 218 с.
9. Ордин, Д. А. Перевод технологии литья по выплавляемым моделям в авиастроении на керамику, полученную с использованием связующих на водной основе. Обзор выполненных исследований / Д. А. Ордин, Е. Н. Новокрещенных, В. З. Пойлов, Н. П. Углев // *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология* – 2016. – № 3. – С. 59–74.
10. Никифоров, С. А. Экономическая оценка качества технологии ЛВМ /

С. А. Никифоров, М. В. Никифорова // *Литье и металлургия* – 2012. – Т. 3 (67). – С. 89–90.

11. Жилин, С. Г. 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.

12. Жилин, С. Г. Экспериментальное определение параметров регрессионной зависимости Кольрауша для пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций / С. Г. Жилин, О.Н. Комаров, Д.А. Потянихин, А.А. Соснин // *Инженерный журнал наука и инновации* – 2018. – № 2(74) – С. 9.

13. Жилин, С. Г. Влияние параметров уплотнения порошкового тела из воскообразного материала на формирование остаточных напряжений прессовки / С. Г. Жилин, Н. А. Богданова, О. Н. Комаров // *Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия Механика предельного состояния* – 2019. – Т. 3 (41). – С. 110–121.

14. Радцевич, Х. М. расчет припусков и межоперационных размеров в машиностроении: учебное пособие / Х. М. Радцевич – М.: Высшая школа, 2004. – 272 с.

15. Прокопчук, Н. Р. Модельные составы для точного литья / Н. Р. Прокопчук, Н.Д. Горщарик, А.Ю. Ключев, Н.Г. Козлов, Е.И. Рожкова, И.А. Латышевич, Н.А. Бакович, // *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук.* – 2015. – № 4. – С. 122–128.

16. Оспенникова, О.Г. Теплофизические и реологические характеристикм синтетических смол для модельных композиций /О.Г.Оспенникова // *Литейное производство* – 2016. – № 10 – С. 26–28.

17. Власова, К. А. Взаимодействие модельных составов с пластиковой оснасткой, изготовленной с помощью технологии 3D-печати / К. А. Власова, Т. Д. Клюквина, А. А. Леонов, С. А. Ларионов // *Труды ВИАМ* – 2018. – № 2(62) – С. 53–61.

18. Harun, Z. Shell Mould Composite With Rice Husk / Z. Harun, N. H. Kamarudin, Nur Azam Badarulzaman, M. S. Wahab // Key Engineering Materials – 2011 – № 471-472– С. 922–927.
19. Трифонов, Ю. И. Способ упрочнения оболочковых форм жидкоподвижным опорным наполнителем / Ю. И. Трифонов, В. А. Героцкий, Т. Д. Курилина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева – 2013. – № 5 (102). – С. 328–333.
20. Сапченко, И. Г. Улучшение экологии литья по выплавляемым моделям использованием пористых удаляемых моделей / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров // Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – № 2. – С. 29–33.
21. Сапченко, И. Г. Управление структурой и свойствами пористых комбинированных удаляемых моделей / И. Г. Сапченко, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров – Владивосток : Дальнаука, 2007. – 138 с.
22. Пат. 2632051 РФ, МПК В22С 7/02. Способ изготовления выплавляемых моделей / Жилин С. Г., Комаров О. Н., Соснин А. А., Панченко Г. Л.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук. – заявл. 13.05.2016; опубл. 02.10.2017 Бюл. № 28
23. 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.–
24. 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.
25. Жилин, С. Г. Особенности формирования пористой структуры прессовок из полимерного дисперсного материала / С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, А. А. Соснин, Д. А. Потянихин // Ученые записки КнАГТУ – 2016. –Т. IV, № 28. – С.

26–33.

26. Бозо, Н. В. Состояние машиностроения в современной российской экономике / Н. В. Бозо, Е. В. Малышева, Н. А. Филатьева // Идеи и идеалы – 2020. – Т. 12. – № 4-2 – С. 277–290.

27. Умархаджиева, С. Р. Инновационные технологии машиностроения / С. Р. Умархаджиева, Г. Ш. Амерханова, Ш. И. Апкаров // Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. – 2023. – №1 – С. 36–41.

28. Gupta, H. N. Manufacturing processes / H. N. Gupta, R. C. Gupta, A. Mittal – New Delhi: New Age International, 2009. – 179 с.

29. Зубарев, Ю. М. Специальные методы обработки заготовок в машиностроении / Ю. М. Зубарев – М.: Лань, 2015. – 400 с.

30. Фельдштейн, Е. Э. Обработка материалов и инструмент: учеб. пособие / Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич, М. И. Михайлов. – Минск: Новое знание, 2009. – 317 с.

31. Некрасов, С. С. Технология материалов. Обработка конструкционных материалов резанием / С. С. Некрасов, Г. М. Зильберман. – М.: Машиностроение, 1974. – 288 с.

32. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

33. Плотников, А. Л. Управление параметрами лезвийной установки на станках с ЧПУ: монография / А. Л. Плотников / под ред. А. П. Бабичев. – Тольятти: ЗАО "Оникс", 2012. – 231 с.

34. Садоха, М. А. Применение литых деталей в машиностроении / М. А. Садоха, А. А. Андрушевич // Литье и металлургия – 2022. – № 2 – С. 18–22.

35. Lehmus, D. Advances in Metal Casting Technology: A Review of State of the Art, Challenges and Trends—Part I: Changing Markets, Changing Products / D. Lehmus // Metals (Basel). – 2022. – С. 1959.

36. Основы технологии машиностроения. Под ред. В.С. Корсакова. Изд. 3, доп. и перераб. Учебник для ВУЗов. – М. : Машиностроение, 1977. – 416 с.

37. Мельников, А. П. Особенности изготовления и классификация отливок

по технологической сложности производства / А. П. Мельников, М. А. Садоха // *Литье и металлургия* – 2007. – №. 1 (41). – С. 88–92.

38. Специальные технологии литейного производства: учеб.пособие.Ч. 2 / под ред. А. И. Евстигнеев, Е. А. Чернышов. – М. : Машиностроение, 2012. – 436 с.

39. Репях, С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям / С. И. Репях – Днепропетровск : Лира, 2006. – 1056 с.

40. Coghlan, H. H. Notes on the prehistoric metallurgy of copper and bronze in the old world / H. H. Coghlan – Oxford : Oxford University Press, 1975. – 158 с.

41. Ключев, А. Ю. Получение, исследование свойств и разработка технологии модельных составов для точного литья с использованием модифицированной канифоли / А. Ю. Ключев // *Труды БГТУ* – 2021. –серия 2. – № 1 – С. 139–146.

42. Беккерт, М. Мир металла / М. Беккерт – Москва : Мир, 1980. – 152 с.

43. Косняну, К. Литье в керамические формы / К. Косняну, М. Видя – М.: Машиностроение, 1980. – 199 с.

44. Gebelin, J. C. Modeling of the investment casting process / J. C. Gebelin, M. R. Jolly // *Journal of Material Processing Technology* – 2003. – № 135– С. 291–300.

45. Пат. 2123902 РФ, МПК В22С 7/02. Модельная композиция для выплавляемых моделей / Дубровский, В. А.; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество "Пермские моторы" – заявл. 13.11.1997; опубл. 27.12.1998.

46. Гини, Э. Ч. Специальные технологии литья: учебник для вузов / Э. Ч. Гини, А. М. Зарубин, В. А. Рыбкин – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 367 с.

47. Жилин, С. Г. Влияние гранулометрического состава и скорости выдавливания воскообразной композиции на геометрию длинномерной прессовки при мундштучном экструдировании / С. Г. Жилин, Н. А. Богданова, О. Н. Комаров // *Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия Механика предельного состояния* – 2018. – № 4(38)– С. 54–64.

48. Bemblage, O. A study on the blended wax patterns in investment casting

process / O. Bemblage, D. V. Karunakar // Proc. World Congr. Eng. – 2011. – № 1. – С. 721 - 727.

49. Пат. 2177387 РФ, МПК В22С 7/02. Композиция для изготовления выплавляемых моделей / Елисеев Ю.С., Поклад В.А., Оспенникова О.Г., Шункин В.Н., Хайченко В.Е.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное унитарное предприятие "Московское машиностроительное производственное предприятие "Салют" – заявл. 31.05.2000; опубл. 27.12.2001 Бюл. № 36.

50. Оспенникова, О. Г. Модельные композиции на основе синтетических материалов. Особенности физико-механических и технологических свойств / О. Г. Оспенникова, Л. В. Пикулина, В. Ю. Орлова // Труды ВИАМ – 2018. – Т. 70, № 10– С. 37–44.

51. Пат. 1125371 РФ, МПК E21C 39/00 . Состав для изготовления моделей из эквивалентного материала / М. С. Злотников, Ф. П. Глушин; заявитель: Всесоюзный ордена трудового красного знамени научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – заявл. 29.06.1983; опубл. 23.11.1984.

52. Пат. 2162386 РФ, МПК В22С 7/02. Композиция для изготовления выплавляемых моделей / Оспенникова О.Г., Ольхова Р.М., Шункин В.Н., Бойцов П.Ю., Ефремов А.А., Серова Н.Е.; заявитель и патентообладатель: Государственное предприятие Московское машиностроительное производственное предприятие "САЛЮТ"– заявл. 17.03.2000; опубл. 27.01.2001 Бюл. № 3

53. Оспенникова, О. Г. Исследование и разработка параметров технологического процесса изготовления моделей из модельных композиций на основе синтетических восков / О. Г. Оспенникова // Авиационные материалы и технологии – 2014. – № 3 – С. 18–21.

54. Прокопчук, Н. Р. Повышение теплостойкости модельного состава наноалмазными частицами / Н. Р. Прокопчук, А. Ю. Ключев, И. О. Лаптик // Труды БГТУ Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2022. – № 1 (253). – С. 96–100.

55. Пат. 616037 РФ, МПК В22С 7/02. Модельная композиция для изготовления выплавляемых моделей / Зайчиков А. А., Зайчикова Т. В., Здобнов В. Т., Зуев Г. И.; заявитель: Ордена ленина предприятие П/Я Р-6639 – заявл. 19.07.1976; опубл. 25.07.1978.
56. Пат. 2104818 РФ, МПК В22С 9/04. Способ изготовления пенополистироловой газифицируемой модели / Евстигнеев, А. И., Черномас В.В.; заявитель и патентообладатель: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет – заявл. 29.01.1996; опубл. 20.02.1998.
57. Сергиенко, О. С. Методика и результаты экспериментального определения свойств модельного состава Paracast / О. С. Сергиенко, Г. А. Бялик // Вестник двигателестроения – 2013. – № 1. – С. 79 - 82
58. Никитин, К. В. Исследование линейной усадки модельных составов и механизмов взаимодействия в системе «выплавляемая модель - огнеупорная керамическая форма» / К. В. Никитин, В. Н. Дьячков, В.И. Никитин, А. Ю. Баринов // Известия вузов. Цветная металлургия – 2019. – № 6 – С. 42–50.
59. Головин, С. Я. Особые виды литья / С. Я. Головин –М.: МАШГИЗ, 1959. – 463 с.
60. Singh, R. Investigations for Dimensional Accuracy of Investment Casting Process after Cycle Time Reduction by Advancements in Shell Moulding / R. Singh, S. Singh, V. Mahajan // Procedia Mater. Sci. – 2014. –№ 4. – С. 859–865.
61. Pattnaik, S. Developments in investment casting process—A review / S. Pattnaik, D. B. Karunakar, P. K. Jha // J. Mater. Process. Technol. – 2012. – № 212. – С. 2332–2348.
62. Кочуров, А. С. Справочник рабочего-модельщика / А. С. Кочуров, А. Г. Назаров, А. Г. Засыпкин, Н. Р. Гиммельман, А. Ф. Волегов, А. А. Нестеров,– М. : МАШГИЗ, 1963. – 360 с.
63. Зленко, М. А. .Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров / М. А. Зленко, В. М. Нагайцев, В. М. Довбыш – Москва : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
64. Толочко, Н. К. Применение технологии экструзионной 3D-печати в

литейном производстве / Н. К. Толочко, А.А. Андрушевич, П.Н. Василевский, П.С. Чугаев // *Литье и металлургия* – 2018. – № 4(93). – С. 139–144.

65. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в опытном литейном производстве. Часть I. Литье металлов и пластмасс с использованием синтез-моделей и синтез-форм / М. А. Зленко, П. В. Забеднов // *Металлургия машиностроения* – 2013. – № 2 – С. 45–54.

66. Шумков, А. А. Экспериментальное определение деформаций поверхности литевых мастер-моделей при послойном синтезе фотополимерного материала / А. А. Шумков, Т. Р. Абляз // *Новые материалы и технологии производства* – 2015. – № 3(87) – С. 54–57.

67. Свиридов, Д. А. Проблемы использования 3D-печати методом FDM в технологическом процессе литья по выплавляемым моделям / Д. А. Свиридов, Д. Ю. Левин, О. А. Рябинина // *Вестник науки и образования* – 2020. – 17 (95) часть 2 – С. 37–40.

68. Толочко, Н. К. Изготовление выплавляемых моделей с использованием аддитивной технологии листового ламинирования / Н. К. Толочко, П.В. Авраменко, В.Б. Кравцов, А.М. Хартанович, Д.И. Копчик // *Литье и металлургия* – 2024. – С. 25–32.

69. Гуляева, Т. Б. Этилсиликатные суспензии для керамических форм / Т. Б. Гуляева и др. // *Литейное производство* – 1992. – № 6. – С. 18–23.

70. Дубровин, В. К. Комбинированные формооболочки для литья по выплавляемым моделям / В. К. Дубровин, Л.Г. Знаменский, О.М. Пашнина, А.С. Варламов // *Вестник ЮУрГУ* – 2006. – № 10. – С. 98–100.

71. Пат. 2302311 РФ, МПК В22С 9/04. Способ изготовления керамических оболочковых форм для литья по выплавляемым моделям / Дубровин В. К., Знаменский Л. Г., Кулаков Б. А., Карпинский А. В., Пашнина О. М.; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Уральский государственный университет" – заявл. 10.04.2006; опубл. 10.07.2007 Бюл. № 19.

72. Емельянов, В. О. Водный раствор кремнезоля как альтернатива

этилсиликату в ЛВМ / В. О. Емельянов, К.В. Мартынов, В.Н. Мутилов, А.В. Соколов, В.П. Суханова // Литейное производство – 2013. – № 3. – С. 27–28.

73. Пат. 557864 РФ, МПК В22С 9/04; В22С 1/10 ; В22С 3/00. Смесь для упрочнения оболочковых керамических литейных форм / Синюшин Ю. С., Перевозкин Ю. Л., Гаюн Ю. А., Абросимов Ю. Л., Киричек В. С.; заявитель: Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт технологии машиностроения – заявл. 03.11.1975; опубл. 15.05.1977.

74. Пат. 282604 РФ, МПК В22С 3/00. Состав для упрочнения керамических оболочек в производстве литья по выплавляемым моделям / Черников В. А., Доценко В. К., Толмачев В. П., Севрук О. К., Угрянская Р. А., Маркин М. М. – заявл. 07.01.1969; опубл. 28.09.1970, бюл. № 30.

75. Евстигнеев, А. И. Особенности оболочковых форм и отливок, полученных на этилсиликатных суспензиях, приготовленных барботажным способом / А. И. Евстигнеев, В. В. Васин, В. В. Черномас // Авиационная промышленность – 1990. – № 7. – С. 70–71.

76. Волокнистые композиционные материалы / под. ред. Бокштейна С. З. – М : Мир, 1976. – 284 с.

77. Пат. 2227769 РФ, МПК В22С 7/02. Способ изготовления удаляемых моделей / Сапченко И. Г., Жилин С. Г., патентообладатель: Государственное учреждение Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН – заявл. 21.12.2000; опубл. 27.04.2004 Бюл. № 12.

78. Кропивницкий, Н. Н. Технология металлов / Н. Н. Кропивницкий и др. – Ленинград : Машиностроение, 1964. – 503 с.

79. Андриевский, Р. А. Порошковое материаловедение / Р. А. Андриевский – М. : Металлургия, 1991. – 208 с.

80. Актуальные проблемы порошковой металлургии / под. редакцией Романа, О.В. Аруначалама, В.С. – М.: Металлургия, 1990. – 232 с.

81. Бережной, В. Л. Анализ и формализация представлений о неравномерности деформации для технологического развития прессования / В. Л. Бережной // Технология легких сплавов – 2013. – № 1. – С. 40–57.

82. Кипарисов, С. С. Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон – М. : Металлургия, 1980. – 496 с.
83. Федорченко, И. М. Основы порошковой металлургии / И. М. Федорченко, Р. А. Андриевский – Киев : Изд-во АН УССР, 1963. – 420 с.
84. Бальшин, М. Ю. Порошковое металловедение / М. Ю. Бальшин – М. : Metallurgizdat, 1948. – 333 с.
85. Кем, А. Ю. Порошковая металлургия и постнеклассическая наука / А. Ю. Кем, Л. А. Жадько // Вестник ДГТУ. Философские науки – 2009. – № 40. – С. 146–161.
86. Богодухов, С. И. Получение и свойства порошковых материалов: учебное пособие / С. И. Богодухов, А. Д. Проскурин, Е. С. Козик – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2009. – 178 с.
87. Powder Metallurgy / под ред. P. Newkirk, J. Samal. – ASM International, 2015.– 907 с.
88. Upadhyaya, A. Powder Metallurgy: Science, Technology, and Materials / A. Upadhyaya, G. S. Upadhyaya – Universities Press, 2018. – 536 с.
89. Герман, Р. М. Порошковая металлургия от А до Я. Учебно-справочное руководство / Р. М. Герман – Интеллект, 2009. – 336 с.
90. Прогрессивные технологические процессы в порошковой металлургии / под ред. Романа О. В.. – Минск : Вышэйшая школа, 1982. – 159 с.
91. Перевертов, В. П. Порошковые композиты и наноматериалы в гибких технологиях формообразования деталей / В. П. Перевертов, И. К. Андрончев, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем – 2020. – №. 30. – С. 85–95.
92. Порошковая металлургия и высокотемпературные материалы / под ред. Рамакришнана, П. – Челябинск : Металлургия, Челябинское отделение, 1990. – 352 с.
93. Biesuz, M. A review of electromagnetic processing of materials (EPM): Heating, sintering, joining and forming / M. Biesuz, T. Saunders, D. Ke, M. J. Reece, C. Hu, S. Grasso // Journal of Materials Science and Technology 2021. – № 69. – С. 239–272.

94. Жилин, С. Г. Формирование прессовок из порошков полимерных изотропных материалов / С. Г. Жилин, И. Г. Сапченко, О. Н. Комаров // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия Механика предельного состояния – 2016. – № 28. – С. 3–14.
95. Перлин, И. Л. Теория прессования металлов / И. Л. Перлин – М. : Metallurgiya, 1964. – 344 с.
96. Жолобов, В. В. Прессование металлов / В. В. Жолобов, Г. И. Зверев – М. : Metallurgizdat, 1959. – 543 с.
97. Роганов, Л. Л. Способы уменьшения влияния упругого последствия на качество порошковых материалов, спрессованных в закрытых формах / Л. Л. Роганов, Л. В. Попивненко // Технології отримання та обробки конструкційних матеріалів – 2011. – № 1 – С. 78–81.
98. Носков, В. А. Анализ способов и устройств для уплотнения мелкофракционных шихт / В. А. Носков, С. В. Ващенко // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' – 2006. – № 238. – С. 313–320.
99. Попильский, Р. Я. Прессование порошковых керамических масс / Р. Я. Попильский, Ю. Е. Пивинский – М. : Metallurgiya, 1983. – 176 с.
100. Жданович, Г. М. Теория прессования металлических порошков / Г. М. Жданович – М. : Metallurgiya, 1969. – 264 с.
101. Цеменко, В. Н. Процессы порошковой металлургии. Теория и физические основы уплотнения порошковых материалов. Учеб. пособие / В. Н. Цеменко – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГПУ, 2005. – 115 с.
102. Koch, A. Mechanism-oriented characterization of the anisotropy of extruded profiles based on solid-state recycled EN AW-6060 aluminum chips / A. Koch, T. Henkel, F. Walther // Eng. Fail. Anal. – 2021. – № 121. – С. 105099.
103. Palmara, G. Functional 3D printing: Approaches and bioapplications / G. Palmara, F. Frascella, I. Roppolo, A. Chiappone, Chiadò, A. // Biosensors and Bioelectronics 2020. – № 175. – С. 112849.
104. Ермаков, С. С. Порошковые стали и изделия. - 4-е изд., перераб. и доп. / С. С. Ермаков, Н. Ф. Вязников – Ленинград : Машиностроение. Ленинградское

отделение, 1990. – 319 с.

105. Грабарник, Л. М. Прессование цветных металлов и сплавов. 2-е изд., перераб. и доп. / Л. М. Грабарник, А. А. Нагайцев – М. : Metallurgiya, 1991. – 342 с.

106. Айзенкольб, Ф. Успехи порошковой металлургии / Ф. Айзенкольб – М. : Metallurgiya, 1969. – 540 с.

107. Бережной, А. С. О зависимости между давлением прессования и пористостью необожженных огнеупорных изделий / А. С. Бережной // Огнеупоры – 1947. – № 4. – С. 32–37.

108. Анциферов, В. Н. Механика процессов прессования порошковых и композиционных материалов / В. Н. Анциферов, В. Е. Перельман – М. : Грааль, 2001. – 631 с.

109. Pöschel, T. Computational Granular Dynamics. Models and Algorithms / T. Pöschel, T. Schwager – Berlin : Springer, 2005. – 324 с.

110. Рожкова, Т. В. Исследование влияния межчастичных контактов на процесс предварительного прессования порошкового материала / Т. В. Рожкова, В. Н. Кусков, Н. И. Смолин // Агропродовольственная политика России. Технические науки – 2017. – № 11 (71). – С. 140–144.

111. Винокуров, Г. Г. Исследование методом Монте-Карло корреляционных характеристик макроструктуры прессованных порошковых материалов / Г. Г. Винокуров, М. В. Федоров, О. Н. Попов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук – 2010. – Т. 12, №1. – С. 313–316.

112. Степанчук, А. М. Закономерности прессования порошковых материалов / А. М. Степанчук – Киев : НМК ВО, 1992. – 176 с.

113. Лахтин, Ю. М. Материаловедение: Учебник для машиностроительных вузов - 2-е изд., перераб. и доп. / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева – М. : Машиностроение, 1980. – 493 с.

114. Грин, Р. Д. Теория пластичности пористых тел / Р. Д. Грин // Механика – М., 1973. – С. 109–120.

115. Kuhn, H. A. и др. Deformation characteristics and plasticity theory of

sintered powder materials / H. A. Kuhn, C. L. Downey // International Journal of Powder Metallurgy – 1971. – № 1. – С. 15–25.

116. Сидоренко, Ю. Н. Прогнозирование механических свойств биометаллического материала на основе многоуровневой математической модели / Ю. Н. Сидоренко, Н. А. Шевченко // Физическая мезомеханика – 1999. – № 2 1-2. – С. 37–41.

117. Соколкин, Ю. В. и др. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел / Ю. В. Соколкин, А. А. Ташкинов – М. : Наука, 1984. – 116 с.

118. Трусов, П. В. Многоуровневые модели неупругого деформирования материалов и их применение для описания эволюции внутренней структуры / П. В. Трусов, А.И. Швейкин, Е. С. Нечаева, П.С. Волегов // Физическая мезомеханика – 2012. – Т. 15, № 1. – С. 33–56.

119. Штерн, М. Б. Феноменологические теории прессования порошков / М. Б. Штерн, Г.Г. Сердюк, Л.А. Максименко, Ю.В. Трухан, Ю.М. Шуляков – Киев : Наукова думка, 1982. – 140 с.

120. Hrairi, M. Modeling the powder compaction process using the finite element method and inverse optimization / M. Hrairi, H. Chtourou, A. Gakwaya, M. Guillot // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2011. – Т. 56, № 5-8 – С. 631–647.

121. Кунин, Н. Ф. Закономерности прессования порошков различных материалов / Н. Ф. Кунин, Б. Д. Юрченко // Порошковая металлургия – 1963. – № 6. – С. 3–10.

122. Гольдштейн, Р. В. Континуальные модели в динамике гранулированных сред. Обзор / Р. В. Гольдштейн, С. В. Кузнецов // Вычислительная механика сплошных сред – 2015. – Т. 8, № 1 – С. 35–59.

123. Гропянов, А. В. Порошковые материалы: учебное пособие / А. В. Гропянов, Н. Н. Ситов, М. Н. Жукова – Санкт-Петербург : ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. – 74 с.

124. Ефашкин, Г. В. О гиперболической зависимости прочности

прессованных изделий от давления пресования / Г. В. Ефашкин, В. А. Черных // Конструкционные углеграфитовые материалы – М. : Металлургия, 1964. – 256–261 с.

125. Крижановский, В. В. Исследование процесса консолидации гранул методом дискретного элемента / В. В. Крижановский, В. И. Мали, Э. Р. Прууэл // Физическая мезомеханика – 2021. – Т. 24 6. – С. 58–64.

126. Власов, А. В. Реализация модели Гурсо-Твергарда-Нидельмана для расчета процессов холодной объемной штамповки несжимаемых материалов / А. В. Власов, Д. А. Герасимов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение – 2017. – № 8(689) – С. 8–17.

127. Фук, Д. В. Исследование процесса уплотнения порошковых материалов с использованием программного пакета Abaqus / Д. В. Фук, С. В. Ганин, В. Н. Цеменко // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета – 2016. – № 1(238) – С. 100–110.

128. Адамов, А. А. 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. – С. 55–75.

129. Фук, Д. В. Моделирование процесса осадки порошкового материала в оболочке / Д. В. Фук, В. Н. Цеменко, С. В. Ганин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета – 2015. – № 3(226). – С. 30–39.

130. Розин, Л. А. Метод конечных элементов / Л. А. Розин // Соросовский образовательный журнал – 2000. – Т. 6, № 4. – С. 120–127.

131. Krok, A. Finite element modeling of powder compaction / A. Krok, C. Y. Wu // NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology – 2017. – Part F1. – С. 451–462.

132. Rahman, M. M. Development of a finite element model of metal powder compaction process at elevated temperature / M. M. Rahman, A. K. Ariffin, S. S. M. Nor // Appl. Math. Model. – 2009. – Т. 33. – № 11 – С. 4031–4048.

133. Gao, Y. Calibration and verification of DEM parameters for the quantitative simulation of pharmaceutical powder compression process / Y. Gao, G. De Simone, M. Koorapaty // Powder Technol. – 2021. – № 378. – С. 160–171.
134. Шилько, Е. В. Развитие формализма метода частиц для описания деформирования и разрушения гетерогенных сред различной природы / Е. В. Шилько // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского – 2011. – №4 (4). – С. 1867–1869.
135. Cundall, P. A. and others A discrete numerical model for granular assemblies / P. A. Cundall, O. D. L. Strack // Géotechnique – 2015. – Vol. 29. – P. 47–65.
136. Чепеленкова, В. Д. and others Применение метода дискретных элементов для оценки прочностных свойств упругих сред / В. Д. Чепеленкова, В. В. Лисица // Интерэкспо Гео-Сибирь – 2022. – Vol. т. 2, № 2. – P. 209–214.
137. Барашков, В. Н. Расчетно-экспериментальный метод определения физико-механических характеристик порошковых материалов / В. Н. Барашков, А. В. Герасимов // Вестник ТГАСУ – 2017. – № 4. – С. 128–138.
138. Бурдун, Г. Д. Справочник по Международной системе единиц / Г. Д. Бурдун. Стандартиз / под ред. Г. Д. Бурдун. – Москва, 1977. – 232 с.
139. Vidyarthee, G. and others New development in investment casting process / G. Vidyarthee, N. Gupta // Int. J. Sci. Eng. reseach – Vol. 8. – P. 529–540.
140. ГОСТ 23683 - 2021. Парафины нефтяные твердые. Технические условия. – введ. 01.01.2022.– М.: Российский институт стандартизации, 2021.
141. ГОСТ 29234.3-91. Пески формовочные. Метод определения среднего размера зерна и коэффициента однородности. – 01.01.1993. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1992.
142. Жилин, С. Г. Перспективы метода получения удаляемых моделей прессованием воскообразных материалов в поле действия центробежных сил / С. Г. Жилин, Н.А. Богданова, С.В. Фирсов и др. // Metallurg. - 2023. № 6. - 75-84.
143. 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.

144. Руководство по эксплуатации “Центрифуга лабораторная настольная MLW - T23D”

145. 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.

146. Анциферов, В. Н. Напряженно-деформированное состояние формуемых в центрифуге порошковых материалов / В. Н. Анциферов, Г. В. Перельман // Конструкции из композиционных материалов – 2012. – С. 10–16.

147. DiMaggio, F. L. Material models for granular soils / F. L. DiMaggio, I. S. Sandler // Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE – 1971. № 97 – С. 935–950.

148. Адамов, А. А. Базовые эксперименты для идентификации кэп-модели пластичности гибкого графита / А. А. Адамов, И. Э. Келлер, Н. С. Подкина // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия Механика предельного состояния – 2020. № 3(45)– С. 131–142.

149. Жилин, С. Г. Экспериментальное моделирование процессов формирования объемных прессовок из сферических воскообразных элементов / С. Г. Жилин, Н. А. Богданова, О. Н. Комаров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия – 2022. –Т. 65. № 1. – С. 758–768.

150. Жилин, С. Г. Влияние упругого отклика на размерно-геометрические характеристики протяженной прессовки, полученной из воскообразного материала мундштучным выдавливанием / С. Г. Жилин и др. // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение – 2018. – Т. 20. – С. 27–34.

151. Saha, P. K. Aluminum extrusion technology / P. K. Saha – ASM

International, 2000. – 258 с.

152. Жилин, С. Г. Моделирование процессов обработки материалов давлением на основе оценки напряженно-деформированного состояния прессовок из полимерных модельных композиций с использованием метода конечных элементов / С. Г. Жилин, О. Н. Комаров, А. А. Соснин // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение – 2017. –Т. 19, № 2. – С. 48–66.

153. Кипарисов, С. С. Порошковая металлургия / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон – М. : Металлургия, 1971. – 528 с.

154. Раковский, В. С. Порошковая металлургия в машиностроении. / В. С. Раковский, В. В. Саклинский – М. : Машиностроение, 1973. – 126 с.

155. Буренин, А. А. Движение упруговязкопластической среды в круглой трубе при ее нагреве за счет пристеночного трения / А. А. Буренин, Л. В. Ковтанюк, Г. Л. Панченко // Прикладная математика и механика – 2016. –№ 2. – С. 265–275.

156. Андреева, Н. В. Исследование уплотняемости порошков / Н. В. Андреева, И. Д. Радомысльский, Н. И. Щербань // Порошковая металлургия – 1975. – № 6. – С. 32–42.

157. Sosnin, A. A. Finit element modeling of the stress-strain state of waxy compacts / A. A. Sosnin, N.A. Bogdanova, S.G. Zhilin, O.N. Komarov, // AIP Conf. Proceedings. Mech. Resour. Diagnostics Mater. Struct. MRDMS 2019 - Proc. 13th Int. Conf. Mech. Resour. Diagnostics Mater. Struct. – 2019. – С. 030017.

158. Aleksandrova, E. A. Structural and Mechanical Properties of Paraffin Wax Composites / E. A. Aleksandrova, B. L. Aleksandrov, B. E. Krasavtsev // Chemistry and technology of fuels and oils. – 2018. – № 54(1). – С. 37–43.

159. Doudard, K. A new approach to optimize compression of paraffin materials: influence of particles size and shape / K. Doudard, A. Arhaliass, M. Pouliquen // Int. J. Mater. forming. – 2018. – № 11(2). – С. 247–256.

160. Zhilin, S. G. Decrease in the elastic response in compacting a paraffin-stearin powder composition / S. G. Zhilin, N.A. Bogdanova, O.N. Komarov, A.A. Sosnin // Russ. Metall. – 2021. – № 4 – С. 459–463.

ПРИЛОЖЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2696118

Способ получения биметаллической отливки

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (RU)*

Авторы: *Богданова Нина Анатольевна (RU), Жилин Сергей Геннадьевич (RU), Комаров Олег Николаевич (RU)*

Заявка № 2018140932

Приоритет изобретения 21 ноября 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 31 июля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 21 ноября 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 696 118**⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
B22C 9/04 (2006.01)**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**(52) СПК
B22C 9/04 (2019.05)

(21)(22) Заявка: 2018140932, 21.11.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
21.11.2018Дата регистрации:
31.07.2019Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 21.11.2018

(45) Опубликовано: 31.07.2019 Бюл. № 22

Адрес для переписки:
681005, Хабаровский кр., г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Metallургов, 1, ИМиМ ДВО РАН

(72) Автор(ы):

Богданова Нина Анатольевна (RU),
Жилин Сергей Геннадьевич (RU),
Комаров Олег Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: Коваленко П.А. и др. Новый способ литья по выплавляемым моделям с кристаллизацией под давлением. Актуальные проблемы авиации и космонавтики, 2017, том 1, с. 401-403. SU 996063 A1, 15.02.1983. RU 2314895 C1, 20.01.2008. SU 956141 A1, 07.09.1982. RU 2105637 C1, 27.02.1998. DE 19504949 C1, 22.08.1996.

(54) Способ получения биметаллической отливки

(57) Реферат:

Изобретение относится к литейному производству, в частности к литью по выплавляемым моделям, и может быть использовано в машиностроении. Способ получения биметаллической отливки литьем по выплавляемым моделям включает изготовление каркаса, получение воскообразной модели с каркасом, получение неразъемной огнеупорной оболочковой формы на модели с каркасом, выплавление воскообразной модели из формы, заливку металла с температурой плавления меньшей, чем температура плавления материала каркаса. При этом изготавливают каркас с

размерами меньшими размеров получаемой отливки, устанавливают каркас в пресс-форму, полость которой соответствует размерам и конфигурации отливки, в пресс-форму дозируют порошок воскообразного модельного материала, который напрессовывают на каркас под давлением 0,1-5 МПа, и полученную воскообразную модель выдерживают в пресс-форме не менее 1 минуты. Способ позволяет получать биметаллические отливки высокой размерно-геометрической точности литьем по выплавляемым моделям. 2 ил.

RU 2 696 118 C 1

RU 2 696 118 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2697995

Способ получения биметаллической отливки

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук (RU)*

Авторы: *Жилин Сергей Геннадьевич (RU), Комаров Олег Николаевич (RU), Богданова Нина Анатольевна (RU)*

Заявка № 2018140933

Приоритет изобретения 21 ноября 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 21 августа 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 21 ноября 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) RU (11)

2 697 995⁽¹³⁾ C1

(51) МПК
B22C 9/04 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B22C 9/04 (2019.05)

(21)(22) Заявка: 2018140933, 21.11.2018
(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
21.11.2018
Дата регистрации:
21.08.2019
Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 21.11.2018
(45) Опубликовано: 21.08.2019 Бюл. № 24
Адрес для переписки:
681005, Хабаровский кр., г. Комсомольск-на-
Амуре, ул. Metallургов, 1, ИМиМ ДВО РАН

(72) Автор(ы):
Жилин Сергей Геннадьевич (RU),
Комаров Олег Николаевич (RU),
Богданова Нина Анатольевна (RU)
(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт машиноведения
и металлургии Дальневосточного отделения
Российской академии наук (RU)
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: Коваленко П.А. и др. Новый способ
литья по выплавляемым моделям с
кристаллизацией под давлением. Актуальные
проблемы авиации и космонавтики. 2017. Том
1. с.401-403. SU 996063 A1, 15.02.1983. RU
2314895 C1, 20.01.2008. SU 956141 A1, 07.09.1982.
RU 2105637 C1, 27.02.1998. DE 19504949 C1,
22.08.1996.

(54) Способ получения биметаллической отливки
(57) Реферат:

Изобретение относится к литью по выплавляемым моделям и может быть использовано в машиностроении. Способ получения биметаллической отливки включает изготовление воскообразной модели, получение неразъемной оболочковой формы на модели, выплавление воскообразной модели из формы и заливку металла. При этом каркас изготавливают с размерами, меньшими размеров получаемой отливки, из материала с температурой плавления, большей температуры плавления материала отливки. Каркас устанавливают в стальную пресс-форму, полость которой соответствует размерам

и геометрии отливки. В пресс-форму дозируют порошок воскообразного модельного материала фракции 0,1–4 мм, который напрессовывают в вакууме 80–98 кПа, причем перемещают прессующие элементы пресс-формы со скоростью 0,2–2 мм/с, а по завершении прессования полученную воскообразную модель с каркасом выдерживают в сомкнутой пресс-форме не менее 1 минуты. Способ позволяет получать биметаллические отливки высокой размерно-геометрической точности литьем по выплавляемым моделям. 3 ил.

RU 2 697 995 C 1

RU 2 697 995 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2757139

Способ получения выплавляемой модели тела вращения

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (RU)*

Авторы: *Жилин Сергей Геннадьевич (RU), Комаров Олег Николаевич (RU), Богданова Нина Анатольевна (RU), Предеин Валерий Викторович (RU), Стражко Денис Александрович (RU)*

Заявка № 2021106174

Приоритет изобретения 11 марта 2021 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 октября 2021 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 11 марта 2041 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Нелев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 757 139**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
B22C 7/02 (2006.01)
B22D 13/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B22C 7/02 (2021.05); *B22D 13/00* (2021.05)

(21)(22) Заявка: 2021106174, 11.03.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
11.03.2021

Дата регистрации:
11.10.2021

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 11.03.2021

(45) Опубликовано: 11.10.2021 Бюл. № 29

Адрес для переписки:
681005, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1, ХФИЦ ДВО РАН

(72) Автор(ы):
Жилин Сергей Геннадьевич (RU),
Комаров Олег Николаевич (RU),
Богданова Нина Анатольевна (RU),
Предеин Валерий Викторович (RU),
Стражко Денис Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2530918 C1, 20.10.2014. RU 2632051 C1, 02.10.2017. SU 390862 A1, 25.07.1973. DE 69613140 T2, 13.09.2001. GB 9522741 D0, 10.01.1996.

(54) Способ получения выплавляемой модели тела вращения

(57) Реферат:

Изобретение относится к области машиностроения и может быть использовано при изготовлении выплавляемой литейной модели. Способ получения выплавляемой модели тела вращения включает дозированную подачу порошка воскообразной модельной композиции в форму в виде тела вращения и вращение упомянутой формы относительно ее вертикальной оси. Воскообразная модельная композиция представляет собой порошок фракции не менее 0,4 мм. Используют форму с внутренним радиусом не менее 3 см, которую вращают с

частотой 6000-15000 об/мин. Под действием центробежной силы частицы порошка модельной композиции уплотняются на внутренней поверхности формы без подведения тепла, что позволяет получить модель с требуемой шероховатостью и геометрией. Обеспечивается устранение усадки, коробления поверхности и слоистости модели, что позволяет повысить размерную и геометрическую точность отливок и физико-механические свойства оболочковых форм. 1 табл.

RU 2 757 139 C 1

RU 2 757 139 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2768661

Способ получения выплавляемой модели

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (RU)*

Авторы: *Жилин Сергей Геннадьевич (RU), Богданова Нина Анатольевна (RU), Комаров Олег Николаевич (RU)*

Заявка № 2021134017
 Приоритет изобретения **23 ноября 2021 г.**
 Дата государственной регистрации
 в Государственном реестре изобретений
 Российской Федерации **24 марта 2022 г.**
 Срок действия исключительного права
 на изобретение истекает **23 ноября 2041 г.**

Руководитель Федеральной службы
 по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 768 661**⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
B22C 7/02 (2006.01)
B22D 13/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B22C 7/02 (2022.01); B22D 13/00 (2022.01)

(21)(22) Заявка: 2021134017, 23.11.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.11.2021Дата регистрации:
24.03.2022Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 23.11.2021

(45) Опубликовано: 24.03.2022 Бюл. № 9

Адрес для переписки:
681005, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-
Амуре, ул. Металлургов, 1, Комаров Олег
Николаевич

(72) Автор(ы):

**Жилин Сергей Геннадьевич (RU),
Богданова Нина Анатольевна (RU),
Комаров Олег Николаевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Хабаровский
федеральный исследовательский центр
Дальневосточного отделения Российской
академии наук (RU)**(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2757139 C1, 11.10.2021. RU
2530918 C1, 20.10.2014. RU 2632051 C1,
02.10.2017. SU 390862 A1, 25.07.1973. DE
69613140 D1, 05.07.2001. GB 9522741 D0,
10.01.1996.

(54) Способ получения выплавляемой модели

(57) Реферат:

Изобретение относится к области машиностроения и может быть использовано при изготовлении выплавляемой литейной модели. Способ получения выплавляемой модели включает дозированную подачу воскообразного модельного материала в виде порошка фракции не менее 0,4 мм в форму и вращение формы относительно ее оси. Используют форму с внутренним радиусом не менее 3 см, которую вращают до достижения ею 3000–4000 об/мин, что является достаточным для увеличения плотности модельного материала, при которой он перестает быть сыпучим после прекращения вращения формы. Форму останавливают, помещают в нее

металлические шарики диаметром 1–12 мм в количестве, достаточном для покрытия внутренней поверхности выплавляемой модели хотя бы в один слой, затем вращают форму со скоростью 3500–4000 об/мин. Металлические шарики увеличивают воздействие центробежной силы на модельный материал, за счет чего он уплотняется при уменьшенной скорости вращения формы. Сферическая форма обеспечивает равномерность распределения металлических шариков на внутренней поверхности модели. Обеспечивается устранение усадки, коробления поверхности и слоистости модели. 6 ил., 1 табл.

RU 2 768 661 C 1

RU 2 768 661 C 1