

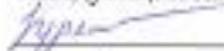
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Кафедра «Механика и анализ конструкций и процессов»
Направление: 15.04.03 – «Прикладная механика»
Профиль - «Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг»

К ЗАЩИТЕ ДОПУСКАЮ

Заведующий кафедрой

 А.А. Буренин

« _____ » _____ 2019 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема «Особенности формирования слоя пористого материала на
жесткой цилиндрической поверхности»

Студент группы 7МПм-1


подпись, дата

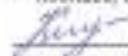
Б.М. Назаров

Научный руководитель,
доктор физ.-мат. наук, профессор


подпись, дата

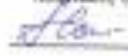
А.А. Буренин

Нормоконтролёр


подпись, дата

Ю.Б. Колошенко

Рецензент, канд. техн. наук


подпись, дата

А.А. Соснин

2019

Никитина
Елена Николаевна

Проверено

12.07.2019 Зачтено Библиотека

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Кафедра «Механика и анализ конструкций процессов»

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

 А.А. Буренин
« 9 » Июль 2019 г.

ЗАДАНИЕ на магистерскую диссертацию

Выдано студенту группы 7МПм-1 Назарову А.М.
Тема магистерской диссертации «Особенности формирования слоя пористого материала на жесткой цилиндрической поверхности»
утверждена приказом по университету № 0920-ЛСС-ПРЧ-МАКП от 25.10.2018 Срок сдачи студентом законченной работы 27 июня 2019

Перечень подлежащих разработке вопросов:

- 1 Цели и задачи теоретического и экспериментального исследования особенностей формирования слоя пористого материала на жесткой цилиндрической поверхности.
- 2 Моделирование процессов прессования воскообразных композиций на основе методов обработки материалов давлением для изготовления выплавляемых моделей
- 3 Экспериментальное определение параметров регрессионной зависимости Кольрауша для пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций
- 4 Формирование прессовок из порошков воскообразных изотропных материалов

Перечень графического материала:

1. Графики зависимости упругого отклика воскообразного модельного материала от фракции.

2. Графики зависимости отклонений размеров длинномерной прессовки от скорости экструзии воскообразных материалов через мундштук.
3. Зависимости напряжения от деформации при различных вариантах начальной упаковки компонентов уплотняемого тела и скорости перемещения пресс-пуансона
4. Динамика зарождения разрушений в элементах уплотняемой системы при одноосном деформировании

Задание принял к исполнению  « 9 » август 2019 г.
(подпись)

Научный руководитель
доктор физ.-мат наук, профессор,
член-корреспондент РАН

 Буренин А.А.
(подпись)
« 9 » август 2019 г.

Аннотация
Особенности формирования слоя пористого материала на жесткой цилиндрической поверхности.

Пояснительная записка 75 с., 45 источников, к диссертации приложен автореферат на 14с.

Представлен анализ состояния проблемы формирования пористого слоя из воскообразных материалов для литья по выплавляемым моделям, а также оценка влияния различных параметров процесса уплотнения на геометрию и физико-механические свойства прессовок. Выдержкой прессовки под нагрузкой достигается устранение негативного воздействия расширяющегося воздуха в результате его выхода через зазоры пресс-формы. В ходе эксперимента получена зависимость плотности прессовки от давления при одноосном вертикальном нагружении в жесткой цилиндрической матрице. Для изучаемого материала установлены величины теоретической (максимально достижимой) плотности и критического давления, при котором достигается теоретическая плотность. Экспериментально определены плотность и пористость в состоянии свободной заливки. Получена кривая аппроксимации, построенная по результатам эксперимента уплотнения воскообразного материала. Определено логарифмическое уравнение аппроксимации необратимого уплотнения при прессовании. Таким образом, получен интервал значений давления, при котором плотность полимерного материала в прессовке будет технологически приемлемой. Практическое значение результатов исследований обусловлено возможностью их применения в реальных производственных условиях для получения металлоизделий повышенной размерной точностью.

Abstract

Features of the formation of a layer of porous material on a rigid cylindrical surface.

The analysis of the state of the problem of the method of forming a porous layer of wax-like materials of moldings for investment casting, as well as an assessment of the effect of various process parameters on their geometry and physical and mechanical properties are presented. By pressing under pressure, the negative effect of expanding air is eliminated as a result of its release through the gaps of the mold. In the course of the experiment, the dependence of the density of the compact on the pressure was obtained under uniaxial vertical loading in a rigid cylindrical matrix. For the material under study, the theoretical (maximum attainable) density and critical pressure, at which the theoretical density is achieved, are established. The density and porosity in the "cast" state were experimentally determined. An approximation curve was obtained based on the results of the experiment on the compaction of the polymer component material. The logarithmic equation of the approximation of irreversible compaction during pressing is found. Thus, the obtained range of pressure values at which the density of the polymer material in the compact will be technologically acceptable.

Введение.....	6
1. Анализ существующих способов формирования выплавляемых моделей из воскообразных материалов для точного литья	9
1.1. Технологии получения точных металлоизделий	9
1.2 Проблемы формообразования в специальных видах литья.....	17
1.3 Анализ материалов применяемых для изготовления выплавляемых моделей.....	21
2.2 Экспериментальные исследования для пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций	24
2.1 Методы экспериментальных исследований	24
Оценка влияния различных параметров процесса на их геометрию и физико-механические свойства	24
2.2 Применение метода конечных элементов для оценки напряженно-деформированного состояния прессовок из модельных композиций.....	26
3. Экспериментальные исследования пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций	44
3.1 Методы экспериментальных исследований	44
3.3 Материально-техническое обеспечение экспериментальных исследований значений упругого отклика	52
3.4 Регрессионный анализ зависимости Кольрауша для пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций	59
4. Практическое получение на прессовки пластичного материала на жесткую цилиндрическую основу.....	65
Заключение	68
Список источников	69

Введение

В машиностроении металлические заготовки получают преимущественно литьем. Поверхность таких заготовок, как правило, нуждается в механической обработке. Для получения точных металлоизделий, особенно в случаях, когда механическая обработка не представляется возможной или недопустима, их получают литьем по выплавляемым моделям (ЛВМ).

Литье — это процесс изготовления металлических деталей путем заливки расплавленного металла или сплава в литейную форму

Для изготовления широкого класса изделий целесообразно применять литые заготовки, используя специальные приемы, литье по выплавляемым моделям

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) — способ получения отливок в многослойных оболочковых неразъемных разовых формах, изготавливаемых с использованием выплавляемых, а также выжигаемых и растворяемых моделей однократного использования.

Наряду с преимуществами данный способ обладает и недостатками один из которых заключается в большом числе технологических факторов, влияющих на качество формы и отливки, и соответственно связанная с этим сложность управления их качеством.

Основные технологические операции в ЛВМ выполняются в следующем порядке: изготовление моделей заливкой, либо запрессовкой жидкого (или в виде пасты) воскообразного модельного состава в пресс-форму, извлечение затвердевшей выплавляемой модели (ВМ); сборка элементов литниково-питающей системы в модельный блок; изготовление керамической оболочковой формы (КОФ) послойным нанесением на блок моделей жидкой огнеупорной суспензии с последующей сушкой; выплавление модельного блока из КОФ; прокаливание КОФ и их заливка расплавом.

Для достижения высокой размерно-геометрической точности (РГТ) отливок ВМ получают прессованием порошков, в качестве которых используются воскообразные материалы. При этом уплотнение материала ВМ осуществляют до технологически обусловленной пористости $P=10\%$, которая, в свою очередь, регламентируется технологически допустимой прочностью получаемой прессовки.

Такой прием позволяет устранить усадочные явления, поверхностные неровности, обеспечить равномерно распределение напряжений модельного материала, существенно снизить напряжения, возникающие в КОФ в процессе выплавления ВМ. Однако, при получении таких ВМ возможно появление дефектов, связанных с упругим последствием прессуемого модельного материала, возникающем после снятия нагрузки. При осуществлении прессования порошка модельной композиции (МК) образуются области его неравномерного уплотнения с различным упругим последствием, что ведет к снижению РГТ прессовок. В результате неравномерности уплотнения и упругого последствия более плотных участков ВМ после получения отливки требуется их механическая доработка. Поэтому важным становится получения ВМ с равномерным распределением свойств по объему. Достижение данного эффекта возможно при соблюдении достаточного узкого интервала таких технологических параметров, как: скорость прессования, гранулометрический состав модельных материалов и др. Отечественная и зарубежная практика получения точного литья достоверными сведениями о технологических режимах изготовления таких моделей и их конечных свойствах не располагает.

Снижение влияния упругого последствия прессовок на их РГТ возможно при использовании гетерогенных равнофракционных модельных материалов, состоящих из растворимых компонентов шаровидной формы и воскообразных полимерных материалов. Форма компонентов МК обуславливается их потенциалом к самопроизвольному равномерному распределению в полости пресс-формы, как перед началом формовки, так и

по завершении последней. Содержание растворимого компонента в составе прессованной ВМ определяется технологической целесообразностью. Такие ВМ удаляются из КОФ в 2 стадии: растворение включений и выплавление воскообразного материала связки. Этим достигается устранение терморасширяющего воздействия модельной массы на внутреннюю поверхность КОФ при удалении ВМ. Диапазон технологически обоснованного содержания гранул растворимого компонента в объеме прессовки составляет 25-50%. Точность пористых моделей на 1-2 качества выше, чем у традиционных.

Таким образом целью данного исследования является: посредством теоретических расчетов и натурных экспериментальных измерений определить влияние параметров формирования пористого слоя из воскообразных материалов на геометрию и физико-механические свойства прессовок

В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

- Анализ существующих способов формирования выплавляемых моделей из воскообразных материалов для точного литья, оценка влияния различных параметров процесса на их геометрию и физико-механические свойства

- моделирование процессов обработки материалов давлением на основе оценки напряженно-деформированного состояния прессовок из модельных композиций с использованием метода конечных элементов

- экспериментальное определение параметров регрессионной зависимости Кольрауша для пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций

- формирование прессовок из порошков воскообразных изотропных материалов

1. Анализ существующих способов формирования выплавляемых моделей из воскообразных материалов для точного литья

1.1. Технологии получения точных металлоизделий

Основные тенденции современного машиностроения – это применение материалов, которые обеспечивают конструктивные и эксплуатационные свойства (качество, прочность, надежность, ресурс и т.д.), при этом не всегда принимаются во внимание их технологические свойства – штампуемость, жидкотекучесть, свариваемость, обрабатываемость, в значительной мере влияющие на выбор заготовок. При выборе способа изготовления заготовок всегда необходимо учитывать технологические свойства. Чем ниже пластичность, тем сложнее получить качественную заготовку способом горячего, и тем более, холодного деформирования. Например, при изготовлении заготовок из трудно деформируемых материалов необходимо учитывать небольшую степень деформации, узкий температурный интервал деформирования, что приводит к дополнительным нагревам при штамповке и соответственно к увеличению себестоимости. Для заготовок из таких материалов очень важно правильно назначить технологические приемы их изготовления. Используются следующие приемы: фасонирование исходных заготовок под последующую штамповку, предварительная штамповка заготовок и другие приемы. Если литейный материал обладает пониженными литейными свойствами, то не рекомендуется его применять при литье в кокиль или литье под давлением, так как из-за низкой податливости металлических форм в отливках возникают литейные напряжения, которые приводят к короблению заготовок. Сплавы склонные к ликвации не применяются для заготовок, изготавливаемых центробежным литьем. Литые заготовки из жаропрочных материалов, склонные к окислению, необходимо

изготавливать в вакуумных плавильно – заливочных установках. В технических условиях для ответственных, нагруженных деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, специальных средах (валы, диски и лопатки турбин и компрессоров, детали зубчатых соединений) указываются требования к качеству материалов и к механическим, а иногда и к эксплуатационным свойствам. Для подобных деталей целесообразно, как правило, применять кованные или штампованные заготовки, которые обладают повышенными механическими свойствами. Но при этом необходимо учитывать, что заготовки из сложнолегированных материалов, например, жаропрочных сплавов на никелевой или кобальтовой основе, получить штамповкой с минимальными припусками на механическую обработку, практически, очень трудно, а иногда и невозможно. В подобных случаях целесообразно применять литые заготовки, используя специальные приемы, например, литье по выплавляемым моделям с направленной или монокристаллической структурой, что позволяет получать заготовки с высокими прочностными и эксплуатационными свойствами.

На стадии формообразования дефекты могут быть вызваны изношенностью оборудования, в котором или с помощью которого изделие придает необходимую форму. При этом могут быть изменены как размеры изделия, так и его конфигурация.

На стадии механической обработки изделия дефекты могут быть вызваны несоблюдением технологии механической обработки по продолжительности обработки и применяемым инструментам и материалам.

Разберем более подробно каждую из стадий технологического процесса изготовления металлических изделий.

Формообразование проводят для придания заготовке необходимой формы и размеров будущей детали или инструмента.

Существует несколько способов формообразования: литье, обработка давлением (ковка, штамповка, прессование, волочение, прокатка), обработка резанием.

Литье — это процесс изготовления металлических деталей путем заливки расплавленного металла или сплава в литейную форму (рис. 1.2).

Первые литые изделия получали еще в 3—2 вв. до н.э. сначала из бронзы, позже из чугуна. Значительное развитие литье из чугуна получило примерно с XII—XIV вв. Стальные отливки начали получать в XIX в., литые детали из алюминиевых и магниевых сплавов в середине XX века. В настоящее время в литейном производстве применяют множество самых различных сплавов.

Некоторые специальные способы литья позволяют получать отливки с высокой чистотой поверхности и точностью по размерам, что резко сокращает или исключает совсем их последующую механическую обработку. Кроме традиционных литейных сплавов: чугуна, стали, бронзы, литье все шире применяют для изготовления изделий из нержавеющей и жаропрочных сталей, магнитных и других сплавов с особыми физическими свойствами.

Литейная форма — это система элементов, образующих рабочую полость, при заливке которой расплавленным металлом формируется отливка.

Первые формы для литья делали из камня или глины. Примерно с конца XVIII в. литейные формы начали изготавливать из специально приготовленной смеси песка и глины. В настоящее время существует более ста различных способов изготовления литейных форм и получения отливок. Около 80% от всей массы чугунных и стальных отливок получают в песчано-глинистых формах. Этим способом получают как мелкие, так и очень крупные отливки, литые детали простой и сложной формы не только из чугуна и стали, но также из различных цветных сплавов.

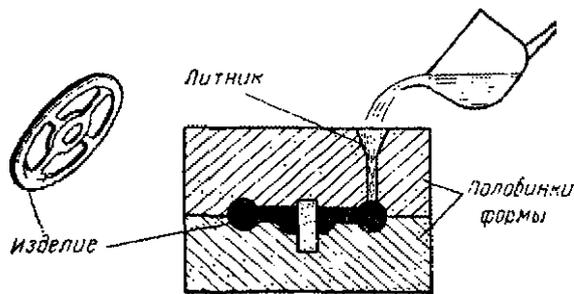


Рис. 1.1. Схема литья в форму

В литейном производстве широко применяют специальные способы литья: *в форму, центробежное литье, литье под давлением, литье по выплавляемым моделям* др. Такими способами можно получить отливки высокой точности, с минимальными допусками по размерам, с высокой чистотой поверхности. Это сокращает или совсем исключает механическую обработку на металлорежущих станках, дает экономию металла, особенно важную при использовании дорогостоящих и дефицитных сплавов, снижает трудоемкость и стоимость детали. Наряду с этим каждый специальный способ литья имеет свои специфические особенности, ограничивающие область его применения. Так, литье по выплавляемым моделям применимо лишь для относительно небольших изделий, центробежное литье — для получения трубок и других изделий, имеющих форму тел вращения.

Литье в песчаные формы производится в разовые литейные формы. При этом состав формовочных смесей выбирают в зависимости от литейного сплава с учетом его температуры плавления, усадки и других свойств, а также массы, размеров и конфигурации отливки.

Основными компонентами формовочных смесей является кварцевый песок, каолиновые или бентонитовые глины.

Заливку форм в механизированных цехах осуществляют при помощи конвейеров на специальной площадке. Сплав заливают в формы с помощью ковшей; их конструкция, вместимость и другие особенности зависят от массы отливки и свойств сплавов.

Расплав перед заливкой в формы некоторое время выдерживают в ковше для выделения газов, всплывания шлака и неметаллических включений. Заливку проводят, не прерывая струи; литниковая чаша должна быть полной. При перерывах струи расплав поступает в полость формы отдельными порциями, может охлаждаться и окисляться, тогда в отливках образуются дефекты — спаи. Струя при заливке не должна размывать формовочную смесь, шлак не должен попадать в форму.

Продолжительность охлаждения в форме затвердевшей отливки зависит от ее массы, толщины сечений, вида сплава, теплофизических свойств формовочных материалов и других условий. Она колеблется в очень широких пределах от нескольких минут для небольших тонкостенных литых деталей до нескольких часов или суток для массивных, крупных отливок.

Излишне длительное охлаждение отливок в форме экономически невыгодно. Поэтому иногда охлаждение ускоряют, например обдувкой воздухом. Излишне горячие отливки из форм удалять нельзя. При охлаждении на воздухе в сплавах могут произойти нежелательные структурные превращения. Вследствие разницы температур на поверхности и во внутренней части массивных деталей возникают термические напряжения, которые могут вызвать коробление и трещины в отливке.

После охлаждения до требуемой температуры разовую литейную дозу (форму) разрушают, выбивая из нее отливку. В современных литейных цехах выбивку проводят с помощью механизмов и установок.

С помощью соответствующих транспортеров выбитую формовочную смесь направляют к месту переработки, отливки — на обрубку и очистку.

Обрубку, т.е. удаление литников, прибылей и дефектов, проводят на дисковых и ленточных пилах, газовой и электродуговой резкой, пневматическими зубилами и другими способами.

Литье в металлические формы(кокили) получило большое распространение. Этим способом получают более 40% всех отливок из чугуна, стали, бронзы, алюминиевых и др. сплавов. Сущность* способа состоит в

получении литых деталей путем свободной заливки расплава в металлические формы. После того, как металл остывает, литник обрезают.

Конструкции кокилей чрезвычайно разнообразны, они могут быть *неразъемными* и *разъемными*. Неразъемные кокили применяют для получения небольших отливок простой конфигурации, которые можно удалять без разъема формы. Литье в металлические формы — один из прогрессивных способов изготовления отливок. Кокиль — форма многократного использования; в нем можно получить 300—500 стальных отливок массой 100—150 кг, около 5000 чугунных мелких отливок, несколько десятков тысяч отливок из алюминиевых сплавов.

Механизация и автоматизация обеспечивают высокую производительность при значительном снижении трудоемкости и стоимости отливок. Вследствие быстрого затвердевания получается мелкозернистая структура сплава, что определяет его высокие механические свойства. Отливки получают с высокой точностью по размерам и чистой поверхностью, что уменьшает или совсем исключает их последующую механическую обработку.

Недостатками являются высокая стоимость кокилей, трудоемкость в изготовлении сложных по конфигурации и тонкостенных отливок, сравнительно невысокая стойкость кокиля при литье из тугоплавких сплавов.

Литье под давлением (рис. 1.3) — наиболее производительный способ изготовления относительно небольших отливок из цветных сплавов с высокой точностью по размерам и чистотой поверхности.

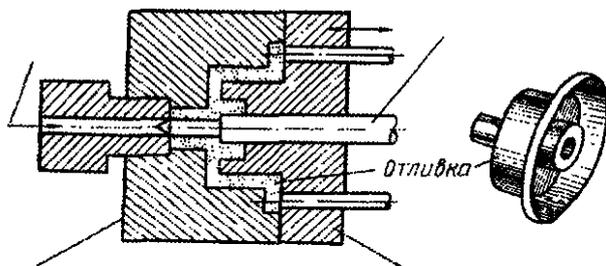


Рис. 1.2. Схема литья под давлением

Литьем под давлением изготавливают отливки от нескольких граммов до десятков килограммов из алюминиевых и других ценных сплавов, реже из тугоплавких сталей. Этот способ позволяет получать литые детали простой формы и сложные фасонные тонкостенные отливки. Нередко такие детали отправляют на сборку без механической обработки, лишь после зачистки заусенцев. Машины для литья под давлением, работающие в автоматическом режиме, имеют очень высокую производительность — до 3000 и более отливок в час.

К недостаткам способа относятся ограниченная масса отливаемых деталей — примерно до 50 кг, высокая стоимость и сложность изготовления пресс-форм, трудность получения отливок со сложными полостями. Отливки имеют газо-усадочную пористость, и их нельзя подвергать термической обработке. При получении отливок из тугоплавкой стали пресс-формы имеют небольшую долговечность.

Наиболее экономически выгодным является литье под давлением в массовом производстве сложных фасонных тонкостенных отливок из цветных сплавов, например деталей приборов и аппаратов.

Центробежное литье осуществляют, заливая металл в форму в поле центробежных сил, возникающих при заливке металла во вращающуюся форму или в результате приведения во вращение заполненной формы.

В настоящее время центробежным способом изготавливают отливки из чугуна, стали, сплавов титана, алюминия, магния и цинка.

Литье по выплавляемым моделям с давних времен применяли для получения литых скульптур, украшений и т.д.

Сущность способа состоит в том, что детали получают заливкой в неразъемные тонкостенные керамические формы, изготовленные с помощью моделей из легкоплавящихся составов. Этот способ имеет следующие преимущества:

- возможность изготовления практически из любых сплавов отливок сложной конфигурации, тонкостенных, с малой шерохова-

тостью поверхности, высоким коэффициентом точности по массе, минимальными припусками на обработку резанием, резким сокращением отходов металла в стружку;

- возможность создания сложных конструкций, объединяющих несколько деталей в один узел, что упрощает технологию изготовления машин и приборов;

- уменьшение расхода формовочного материала, снижение материалоемкости производства;

- улучшение условий труда и уменьшение вредности воздействия литейного производства на окружающую среду.

Наряду с преимуществами, способ обладает следующими недостатками:

- процесс изготовления формы многооперационный, трудоемкий и длительный;

- большое число технологических факторов, влияющих на качество и форму отливки;

- сложность управления качеством;

- большая номенклатура материалов, используемых для получения формы;

- сложность манипуляторных операций, изготовления моделей и форм;

- повышенный расход металла на литники.

Метод литья по выплавляемым моделям широко используется при изготовлении отливок массой от десятков граммов до сотен килограммов из черных и цветных металлов. Особенно широко он применяется для деталей из жаропрочных или специальных труднообрабатываемых сплавов.

1.2 Проблемы формообразования в специальных видах литья

Применение способа ЛВМ обеспечивает возможность изготовления из любых литейных сплавов фасонных отливок, в том числе сложных по конфигурации и тонкостенных; с шероховатостью поверхности от $Rz = 20$ мкм до $Ra = 1,25$ мкм (ГОСТ 2789—73) и повышенной точностью размеров (до 8—10-го квалитетов по | ГОСТ 25347—82 или до 3—5-го классов точности по ГОСТ 26645—85). Способ позволяет получать отливки массой от нескольких граммов до 100 кг; оптимальная масса отливки 0,2 – 12 кг. Имеются примеры изготовления отливок массой более 100 кг. Типовые отливки, изготавливаемые литье по выплавляемым моделям представлены на рис.23 С помощью ЛВМ получают отливки, максимально приближенные по форме и размерам к готовой детали, а в ряде случаев не нуждающиеся в

Отливки из конструкционных сталей, жаропрочных алюминиевых и медных сплавов изготовленные по выплавляемым сплавам. В результате значительно снижаются трудоемкость и стоимость изготовления изделий, сокращаются расход металла и инструмента, потребность в производственных площадях, станочном оборудовании и приспособлениях, уменьшаются энергоемкость производства, а также потребность в рабочих-станочниках высокой квалификации. Применение ЛВМ позволяет проектировать сложные тонкостенные детали (с толщиной стенки 1 мм и менее), объединять отдельные детали в компактные цельнолитые узлы, уменьшая массу и габаритные размеры изделий, создавать конструкции (например, охлаждаемые лопатки ГТД со сложными лабиринтными полостями газового тракта), невыполнимые какими-либо другими методами обработки. Пример изготовления цельнолитой конструкций приведен на рис.24. Рис.24.Цельнолитой ротор из жаропрочного сплава на никелевой основе. ЛВМ позволяет объединить отдельные детали в одну отливку. При

изготовлении деталей, механическая обработка которых очень сложна, а иногда и невозможна без разделения детали на простейшие элементы, литье по выплавляемым моделям дает возможность объединять несколько отдельных мелких деталей в одну общую конструкцию. При этом учитывают экономическую целесообразность получения цельнолитого узла. На рис. 25. приведен пример целесообразной замены одной отливкой сложного сварного узла — корпуса ручек управления, состоящего из пяти деталей, штампованных из стали 50, с последующей механической обработкой. Применение отливки взамен штампованных заготовок, подвергаемых механической обработке и сварке, в 3 раза снизило потери металла в стружку и в 2 раза уменьшило трудоемкость механической обработки (29). Рис.25. Изготовление детали из пяти заготовок (1-5): а – их сваркой (применяемая технология); б – отливка детали по выплавляемым моделям Иногда целесообразно расчленить крупногабаритную деталь на несколько литых заготовок меньшего размера, а затем из отливок с помощью сварки изготовить деталь (29). Рис. 26 Типовые отливки литья по выплавляемым моделям различных вариантов Технологический процесс получения отливок по выплавляемым моделям в сравнении с другими способами литья имеют некоторые особенности: -модель отливки не имеет разъёма, её контуры полностью повторяют форму детали, служат для изготовления только одной литейной формы, в процессе изготовления которой модель уничтожается; -керамическая оболочка не имеет поверхности разъёма; -металл заливается в горячие формы. Процесс изготовления отливок по выплавляемым моделям состоит из следующих этапов. В пресс – формах изготавливают модели деталей и литниковые системы. В качестве материала моделей используют легкоплавкие составы на основе смол, пластмасс, сплавов солей. Модели и литниковые системы соединяют в блоки, на которые слоями наносят суспензии из связующего раствора и пылевидного огнеупорного материала. Слои суспензии для их упрочнения и лучшей взаимной связи обсыпают песком, а затем сушат. Из

полученной многослойной неразъёмной оболочковой удаляют выплавлением, растворением или выжиганием модельный состав. Освобождённые от моделей оболочки прокаливают и заливают металлом. После затвердевания форма разрушается и извлекается заготовка и выполняются отделочные операции отливки. Процесс позволяет объединять в единый блок припаиванием модели и соответственно получать отливки одним блоком (рис.27), что позволяет значительно повысить производительность труда

Рис.27. Керамическая оболочка единого блока моделей 71

Технологическая последовательность процесса представлена на рис.28. При проектировании детали для получения литём по выплавляемым моделям необходимо выполнять следующие требования: -рекомендуемая минимальная толщина стенки 0,7—0,8мм; -отношения толщин сопряженных стенок не должно превышать 1/4; -не целесообразно в отливках получать резьбы; -сопряжения стенок следует оформлять по радиусам или галтелям. На практике удавалось получать минимальную толщину стенки до 0,4 мм.

Рис.28. Технологическая последовательность процесса изготовления отливок по выплавляемым моделям: 1-деталь; 2-пресс-форма; 3-модель; 4- литейный блок; 5- огнеупорное покрытие; 6-керамическая оболочка; 7- опока;8- опорный наполнитель. При изготовлении более толстостенных отливок необходимо учитывать, что в таких стенках может образовываться осевая пористость усадочного происхождения, поэтому более прочные отливки получают не увеличением толщины стенки, а введением рёбер жёсткости.

72 Точность размеров отливок оценивают обычно по отклонению действительного размера от номинального, т. е. по полным полям рассеяния размеров, зависящим от допусков на размеры полости пресс-форм, колебания усадки модельной композиции и расплава металла, свойств оболочки формы. Погрешности подразделяют на систематические и случайные. К первым относятся погрешности изготовления пресс-форм (допуски на размеры их рабочих полостей должны соответствовать 8—10-му качествам по ГОСТ 25347—82), ко вторым — погрешности, вызываемые колебаниями усадки

модельных композиций и металла отливки, объемными изменениями покрытия модели и оболочки формы в процессе их изготовления и эксплуатации. Для отливок поля допусков назначают в соответствии с ГОСТ 26645—85 (для литья по выплавляемым моделям допуск соответствует 3—8-му классам точности)

К литейным свойствам относят технологические свойства металлов и сплавов, которые проявляются при заполнении формы, кристаллизации и охлаждении отливок в форме. Наиболее важные литейные свойства - это жидкотекучесть, усадка (объемная и литейная), склонность сплавов к ликвации и образованию трещин, поглощению газов, пористости и др.

Жидкотекучесть - это способность металлов и сплавов течь в расплавленном состоянии по каналам литейной формы, заполнять ее полости и четко воспроизводить контуры отливки.

Жидкотекучесть литейных сплавов зависит от температурного интервала кристаллизации, вязкости и поверхностного натяжения расплава, температуры металла и формы, при заливке и т.д.

Технически чистые металлы и сплавы, кристаллизующиеся при постоянной температуре (эвтектические сплавы), обладают лучшей жидкотекучестью, чем сплавы, образующие твердые растворы и затвердевающие в интервале температур. С увеличением поверхностного натяжения жидкотекучесть уменьшается тем интенсивнее, чем тоньше канал в литейной форме. С повышением температуры заливки расплавленного металла и температуры формы жидкотекучесть улучшается. Увеличение теплопроводности материала формы снижает жидкотекучесть. Так, песчаная форма отводит тепло с меньшей скоростью, и расплавленный металл заполняет ее лучше, чем металлическую форму. Жидкотекучесть сплавов зависит также от химического состава: фосфор, кремний и углерод улучшают ее, а сера ухудшает. Серый чугун содержит углерода и кремния больше, чем сталь, и поэтому обладает лучшей жидкотекучестью.

Минимально возможная толщина стенки для различных литейных сплавов не одинакова и составляет при литье в песчаные формы для отливок из серого чугуна: мелких - 3-4 мм, средних - 8-10 мм, крупных - 12-15 мм; а для отливок из стали - соответственно 6-7 мм, 10-12 мм и 15-20 мм.

Жидкотекучесть металла определяют путем заливки специальных технологических проб и оценивают линейными размерами заполненной полости канала определенной формы. Наибольшей жидкотекучестью обладает серый чугун, наименьшей - магниевые сплавы.

Усадка - свойство литейных сплавов уменьшать объем при затвердевании и охлаждении. Усадочные процессы в отливках протекают с момента заливки расплавленного металла в форму вплоть до полного охлаждения отливки. Различают линейную и объемную усадку, выраженную в относительных единицах.

Линейная усадка - уменьшение литейных размеров отливки при ее охлаждении от температуры, при которой образуется прочная корка, способная противостоять давлению расплавленного металла, до температуры окружающей среды. Линейную усадку определяют соотношением

1.3 Анализ материалов применяемых для изготовления выплавляемых моделей

8

В настоящее время используют широкую номенклатуру различных химических соединений, на основе которых изготавливают модели. Выбор материала модели зависит, в первую очередь, от способа удаления моделей. Наиболее широкий выбор материалов используется для выплавляемых моделей. Независимо от способа удаления моделей к модельным составам предъявляют следующие основные требования.

Модельные составы должны обладать:

- относительно высокой температурой размягчения, что позволяет сохранять форму моделей при технологических операциях изготовления формы в цеховых условиях;
- сравнительно низкой температурой плавления или разложения для облегчения изготовления моделей и удаления их из формы;
- высокой текучестью для легкого заполнения пресс-формы;
- высокой растворимостью для облегчения удаления растворимых моделей;
- низкой усадкой для обеспечения точности размеров моделей;
- минимальным коэффициентом термического расширения,
- обеспечивающим целостность формы при выплавлении или выжигании моделей;
- технологически необходимой прочностью и твердостью, обеспечивающими целостность модели при изготовлении формы;
- химической инертностью к материалу пресс-формы и керамической оболочки;
- удовлетворительной адгезией к материалам керамической формы;
- минимальной зольностью;
- способностью к регенерации в случае повторных использований и быть безвредными для окружающих.

Для изготовления выплавляемых моделей применяются следующие материалы:

Парафин — смесь предельных углеводородов, плотностью 880, с температурой плавления 40...65

Для модельных составов применяют технический парафин воскоподобную массу белого цвета, содержащую до 3% масла. Зольность не превышает по массе 0,1%. Является недефицитными относительно дешевым материалом.

Церезин — смесь предельных углеводородов с температурой плавления 65...88 °С. Не растворим в воде и спиртах, растворим в бензоле и ограниченно растворим в минеральных маслах. Выделяют из озокерита, петролатума, отложений на трубах, образующихся в трубопроводах при добыче и перекачивании нефти. Синтетический церезин получают из синтез-газа (смесь СО и Н₂). Применяют в качестве компонента пластичных смазок, изоляционного материала в электротехнике, для изготовления свечей (в смеси с парафином), в косметике и медицине. Представляет собой воскообразное вещество от белого до коричневого цвета.

Для изготовления модельных составов чаще используют синтетический церезин.

Стеарин — смесь высших жирных карбоновых кислот, в основном пальмитиновой и стеариновой. Температура плавления 53...65 °С, практически не растворим в воде и ограниченно растворим в органических растворителях. Входит в состав животных жиров и растительных масел. В промышленности получают дистилляцией и кристаллизацией жирных кислот, полученных гидролизом гидрированных подсолнечного, хлопкового масел и животных жиров. Применяется для синтеза высших спиртов, в резинотехнической промышленности, в производстве мыла и свечей. Представляет собой полупрозрачную массу белого или желтоватого цвета. Стеарин дорог, дефицитен и способен взаимодействовать с этилсиликатом, поэтому имеет ограниченное применение в литейном производстве.

2.2 Экспериментальные исследования для пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций

2.1 Методы экспериментальных исследований

Оценка влияния различных параметров процесса на их геометрию и физико-механические свойства

Пористые выплавляемые модели получают формованием порошков модельных композиций различных фракций. Модельные композиции 1 группы представляют собой, как правило, двухкомпонентный сплав парафина и стеарина в различных пропорциях. Прессованные пористые модели отличаются от традиционных выплавляемых моделей физико-механическими свойствами, размерно-геометрической точностью. Плотность пористых моделей на 8-12 % ниже, чем традиционных выплавляемых, полученных запрессовкой жидкого или пастообразного модельного состава в пресс-форму. Так, прочность на изгиб однокомпонентных прессованных моделей с указанной выше плотностью (состоящих из парафина) $\approx 1,0 \div 1,1$ МПа. Такая прочность представляется допустимой, обеспечивающей конструкционную целостность модельного блока в ходе технологических операций. Модельный блок представляет собой единую конструкцию, состоящую из элементов литниково-питающей системы и выплавляемых моделей отливок. Отливки, получаемые литьем по выплавляемым моделям должны соответствовать 11–16 квалитетам при допусках на размеры рабочей полости пресс-формы, не превышающих 8–9 квалитетов (ГОСТ 25347-82). Экспериментально установлено, что размерно-геометрическая точность пористых прессованных моделей простой конфигурации соответствует 9–10-му квалитету, что выше, чем у традиционных выплавляемых моделей.

Однако при получении прессованной модели сложной пространственной конфигурации наблюдается неравномерное распределение

плотности в различных ее участках. Так, значение плотности массивных элементов ниже, чем плотность участков с меньшей площадью поперечного сечения. Величина упругого отклика прессовок снижается с увеличением пористости. По завершении релаксации материала такие характеристики конечной прессовки, как плотность, прочность и др. несколько отличаются от расчетных значений.

При прессовании модельного порошка за счет его трения о стенки пресс-формы предположительно происходит оплавление периферийных зон будущей модели и воздух, расположенный в центральных ее участках не имеет свободного выхода. Параметрами, определяющими величину упругого отклика прессовки при «холодном» уплотнении полимерного дисперсного материала, являются скорость уплотнения, удельное давление, температура материала до уплотнения и после извлечения прессовки из формы. В данном случае для получения прессовки после уплотнения не требуется ее нагрев, т.к. процесс осуществляется за счет появления локальных зон разогрева контактов частиц, из которых состоит порошковое тело. В технологиях холодного прессования, применяемых в порошковой металлургии, принято, что величина частиц порошка лишь частично оказывает влияние на значение давления прессования. Однако ввиду высокой пластичности используемого при получении прессованной пористой модели полимерного порошка его фракция оказывает влияние на величину давления прессования и на упругий отклик сформированного порошкового тела после его разгрузки.

По завершении процесса формирования прессовки воздух, заключенный в пресс-форме с воскообразным модельным материалом, после снятия нагрузки и разъема формы упруго релаксирует.

2.2 Применение метода конечных элементов для оценки напряженно-деформированного состояния прессовок из модельных композиций

При производстве отливок литьем по выплавляемым моделям формирование литой заготовки происходит в керамической оболочковой форме, получаемой послойным нанесением огнеупорной суспензии на модельный блок с прикрепленными моделями отливок. Модельный блок представляет собой единую конструкцию, состоящую из элементов литниково-питающей системы и выплавляемых моделей будущих отливок. Размерно-геометрическая точность и эксплуатационные свойства выплавляемых моделей во многом определяют качество получаемых литых заготовок. Традиционно выплавляемые модели получают заливкой жидкого (или запрессовкой пастообразного) модельного материала в пресс-форму. В качестве модельного материала используют, как правило, воскообразные композиции на основе парафина с различными добавками: стеарин, церезин, буроугольный воск и т.д. [1]. Нарушение технологии получения может привести к появлению ряда дефектов выплавляемых моделей. Последнее, как правило, является следствием усадочных процессов, проходящих при охлаждении модельной массы в пресс-форме. Учет этого явления представляется важным при проектировании пресс-форм. При хранении выплавляемые модели, полученные таким способом нередко подвержены короблению. При заливке модельной массы в пресс-форму материал протяженных (с отношением основания модели к ее высоте более, чем 1 к 10) и тонкостенных (с толщиной стенки менее 1 мм) полимерных моделей при охлаждении испытывает значительные напряжения. Это находит отражение в «сетке» сквозных трещин (рис. 1,а), приводящих к снижению прочностных характеристик моделей в указанных участках.

Отмеченные дефекты не проявляются при получении выплавляемых моделей прессованием порошков модельной массы [2]. В результате этого формируется поверхность модели, размерно-геометрические характеристики

которой определяются характеристиками элементов пресс-формы, взаимодействующих с модельным составом в ходе его уплотнения. Экструзией полимерного порошка можно получить тонкостенные формованные элементы моделей, протяженность которых практически не ограничена. На рис. 1,б представлен вариант получения формовки стержня круглого сечения. Целостность сформированной прессовки обеспечивается за счет появления в ходе уплотнения порошка локальных участков, в которых достигается температура плавления материала.

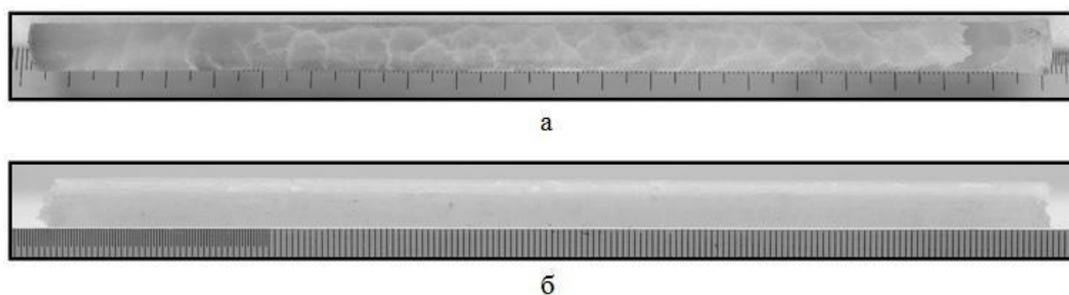


Рис.1. Протяженные элементы выплавляемой модели: а - полученный вертикальной заливкой парафина марки Т1 (температура заливки $t = 60^{\circ}\text{C}$); б - полученный «холодной» экструзией.

Точность пористых моделей, как правило, на 1-2 квалитета выше, чем у традиционных. При получении керамических оболочковых форм по пористым моделям повышается стойкость первых к образованию трещин. Трещины в керамической форме появляются при удалении из нее традиционного модельного блока вследствие расширения модельной массы при ее нагреве. Модельная масса пористых выплавляемых моделей при удалении из керамической оболочковой формы в результате нагрева расширяется в пределах объема «своих» пор и не пропитывает оболочковую форму. Отсутствие модельной массы в порах оболочковой формы предотвращает ее растрескивание при прокатке перед заливкой металлическим расплавом.

Важным при формировании пористой выплавляемой модели является отсутствие размерно-геометрических дефектов, связанных с упругим откликом материала модели. Упругий отклик, возникает в объеме прессовки, либо в локальных ее участках вследствие переуплотнения. Начальная (насыпная) плотность порошка модельной массы составляет 0,34-0,35 г/см³. При уплотнении порошка модельной массы, объем материала прессовки, в ходе его деформирования, сокращается более чем в 2 раза, а плотность такой прессовки составляет 0,80-0,84 г/см³. Упругий отклик появляется вследствие разгрузки напряжений, накапливающихся в материале при его деформировании [3] и приводит к увеличению объема прессовки, понижая ее плотность. Величина упругого отклика зависит от ряда параметров: температуры, формы и фракции компонентов деформируемого материала, плотности прессовки. Экспериментально установлено, что упругий отклик прессовок из порошков модельных композиций хлопьевидной формы фракции 1,0 мм составляет 0,49-0,42 % при получении моделей с плотностью 6 – 12 % от плотности выплавляемой модели, полученной свободной заливкой модельного материала в пресс-форму [4]. Величина упругого отклика прессовок снижается с увеличением пористости. По завершении релаксации материала такие характеристики конечной прессовки, как плотность, прочность и др. несколько отличаются от расчетных значений. В ряде случаев для получения прессовок с повышенной прочностью и пористостью для изготовления прессовок применяют комбинированные составы на основе порошков воскообразных и растворимых компонентов [5]. При использовании таких моделей в технологический процесс вносятся корректуры: перед выплавлением модельной массы из керамической оболочки последнюю погружают в воду, которая, проникая через поры оболочковой формы, взаимодействует с растворимыми компонентами модели, увеличивая их пористость. Такие модели называют пористыми удаляемыми. При отмеченных недостатках такой способ позволяет получать

выплавляемые модели с высокими значениями размерной и геометрической точности.

Указанные преимущества и недостатки прессованных пористых моделей из полимерных или комбинированных дисперсных материалов определяют необходимость изучения и совершенствования процесса их получения. Учет напряженно-деформированного состояния и, как следствие, упругого отклика материала прессовок, необходим при проектировании оснастки для их получения [6]. В настоящее время напряженно-деформированное состояние прессовки из конкретного материала с учетом фракционности и формы его компонентов, заданных параметрах деформирования, определяется экспериментально. Изучение возможности прогнозирования напряженно-деформированного состояния прессовок из полимерных модельных композиций математическими расчетами с использованием метода конечных элементов представляется актуальным.

Целью настоящей работы является определение вариантов прогнозирования напряженно-деформированного состояния прессовок из порошков полимерных модельных композиций на основе расчета методом конечных элементов и натурального эксперимента, с последующим сравнением полученных результатов.

В рамках данной цели решались следующие задачи:

- определение констант материала порошкового тела, необходимых для виртуального получения характеристик напряженно-деформированного состояния прессовок;

- сравнение графических зависимостей нагрузки (кН) от деформации (%), полученных в ходе математических расчетов и натуральных исследований при одноосном вертикальном формировании прессовок из порошкового тела;

- на основе экспериментальных данных определение возможности использования метода конечных элементов, для составления прогноза

напряженно-деформированного состояния прессовки из полимерных порошковых материалов.

Уплотнение порошковых материалов характеризуется тремя основными стадиями [7]: разрушение «арок» в ходе интенсивного уплотнения порошка – структурная деформация порошкового тела; максимально плотная упаковка частиц порошка, сопротивляющихся сжатию, при котором давление прессования растет, плотность не увеличивается, а пластическая деформация в приконтактной зоне носит локальный характер; давление прессования превышает сопротивление сжатию частиц порошка, пластическая деформация охватывает весь объем каждой частицы, смещение межчастичных контактов прекращается.

Экспериментально установлено, что при прессовании порошков происходит взаимное наложение стадий порошкового тела, протекающих одновременно. Преимущественное значение для получения прессовок с однородным распределением плотности имеет перемещение частиц на первой и второй стадии прессования. Для получения равномерного упругого отклика материала прессовки важным является достижение изотропности свойств порошкового тела во всем его объеме на момент прессования, соответствующий началу пластической деформации. На равномерность распределения свойств в объеме прессовки из однородного материала влияют также следующие условия: форма и фракция компонентов смеси, геометрические параметры получаемой прессовки (соразмерность высоты, ширины и толщины), скорость прессования [8]. При равномерном расположении компонентов в гетерогенной смеси очаги деформации полимерного компонента локализуются в окрестности более плотного компонента смеси, что позволит получить равномерный упругий отклик сформированной системы после извлечения из пресс-формы.

В ходе исследований процесса уплотнения модельного материала осуществлялись натурные эксперименты и математические расчеты, по

завершении которых проводили сравнение полученных результатов. Основная задача указанных экспериментов – определить адекватность данных, полученных в ходе математического моделирования уплотнения материала, напряженно-деформированного состояния порошковых одно- и двухкомпонентных тел, подвергающихся формоизменению.

Для моделирования процесса формоизменения материала использовали метод конечных элементов, позволяющий решить совместную механическую и температурную задачу, имеющий адаптивную автоматизированную систему генерации сетки конечных элементов с учетом упругих и вязко-пластических свойств материала.

В ходе предыдущих исследований установлено наименьшее различие значений продольного и поперечного упругого отклика при прессовании порошкового тела, состоящего из равнофракционных элементов шаровидной формы [7, 8, 9, 10].

Расчет процесса уплотнения порошкового тела из шаровидных элементов представляется затруднительным. В ходе расчета напряженно-деформированного состояния 2-х и более вертикально одноосно расположенных шаров появляются ошибки триангуляции при построении пространственной сетки объектов моделирования.

Для корректного расчета формоизменения порошкового тела требуется определить некоторые константы и параметры. Для материала уплотняемого порошкового тела определяем: плотность, кривую сопротивления деформации, зависящую от таких параметров, как деформация, скорость деформации, температура. Для материала пресс-формы определяем: кривую сопротивления деформации, плотность, модуль Юнга, который является важной физической величиной, характеризующей свойства материала сопротивляться сжатию при упругой деформации. В качестве материала имитатора растворимых компонентов в эксперименте выбрана сталь 45.

Свойства стали 45 соответствуют ГОСТ 1050-88 (модуль Юнга: 210 ГПа, плотность 7810 кг/м³) [11].

Требуемые технологические и эксплуатационные свойства выплавляемых моделей в производстве достигаются использованием преимущественно многокомпонентных модельных материалов, например ПС 50/50, в котором содержание парафина и стеарина равны. С целью минимизации погрешности эксперимента в качестве порошкового тела использовали полимерный однокомпонентный материал на основе парафина по ГОСТ 23683-89 [12]. Так как нефтяной парафин является относительно легкоплавким материалом, то, среди предлагаемых ГОСТ 23683-89, выбираем парафин марки Т1. К свойствам, определяющим параметры процесса уплотнения этого материала, отнесем: плотность материала, полученного свободной заливкой 0,86 г/см³ с учетом распределенной пористости; температура плавления, определенная при помощи прибора дифференциально-термического анализа Shimadzu DTG-60Н 60 °С (ГОСТ 23683-89 регламентирует температуру плавления для парафина марки Т1 52-58 °С.).

Так как выбранный полимерный материал не является конструкционным, то стандартное значение модуля Юнга для парафина в известных источниках обнаружить не представляется возможным. Для вычисления модуля Юнга для парафина марки Т1 были изготовлены цилиндрические образцы с разными отношениями диаметра к высоте (1:1; 1:1.5; 1:2), которые были разрушены на тестовой машине AG-X plus Shimadzu.

После проведения испытания, полученные образцы были проверены по следующему условию:

$$\varepsilon_c^* \leq 0,4 \frac{D^2}{h^2} \quad (1),$$

где ε_c^* - максимальная номинальная относительная деформация при сжатии, которая достигается при испытании, безразмерная величина, D - диаметр цилиндра, мм, h - высота образца, измеренная параллельно направлению сжимающей силы, мм [13].

Экспериментальные данные, соответствующие представленной выше методике расчета помещены в табл.1. В табл.1 приведены результаты по ряду образцов, сопоставимых начальных высот по 3-м группам.

Из табл.1 видно, что условию (1) удовлетворяют все элементы выборки. Однако, для образцов 2-ой группы высоты Δg (мм), на которых происходило разрушение, можно считать одинаковыми. Образцам этой группы, в которой соотношение диаметра и высоты $\approx 1:1.5$, также свойственна стабильность в вычисленной относительной деформации. В связи с этим для расчета модуля Юнга решено использовать средние данные по группе 2.

Модуль Юнга рассчитаем по следующей формуле:

$$E = \frac{Fh}{S\Delta h} \quad (2),$$

где F - нормальная составляющая силы, S - площадь поверхности, по которой распределено действие силы, h - высота деформируемого стержня, Δh - модуль изменения высоты прессовки в результате упругой деформации (измеренного в тех же единицах, что и высота h).

Модуль Юнга по формуле (2) определяем как среднее для всех экспериментальных значений напряжений, характерных для области упругой деформации. Результат расчета приведен в табл.2. Приведенное в табл.2 среднее значение E для парафина марки Т1 используем в расчетах, в ходе которых получаем зависимости нагрузки (H) от перемещения (мм).

Таблица 1

Определение соответствия образцов из парафина марки Г1 условию 1

ру пп а	омер образца	высота h, мм	В ысота Δg , на которой произо шло разру шение, мм	F , сила, при которой произ ошло разру шение , Н	относ итель ная дефо рмац ия	$\varepsilon_{ср}^* = \frac{\Delta g}{h}$	$g_{ср}$ сред няя $\varepsilon_{ср}^*$ высо та для сери и	диаметр D,	=	$D^2/4$, мм ²	$0,4 \frac{D^2}{h^2}$
		2	0	1	0	.026	.702	7.5	93.9	.436	
		6.35	.635	203.06	.0240			7.6	98.3	.412	
		7.2	.865	086.79	.0318			7.1	76.8	.4	
		4	0	1	0	.022	.886	7	72.6	.182	
		0.35	.888	301.05	.022			7.2	81.1	.182	
		0.6	.886	410.52	.0218			7.2	81.1	.18	

	2.8	.835	181.44	.0158				7.3	85.3	.107
	2.45	.789	304.27	.015	.015	.803		7.3	85.3	.108
	3.2	.786	359.11	.0148				7.3	85.3	.105

Таблица 2

Определение среднего значения модуля Юнга для парафина марки Т1

Номер образца группы 2	F_i , среднее значение силы области упругой деформации, Н	Δh_{cp}	$E_i = \frac{F_i h}{S \Delta h}$	Среднее значение E , ГПа
4	552.92	0.46	84.36	81.91
5	398.16	0.35	80.25	
6	583.43	0.50	81.13	

Моделировать формоизменение порошкового тела, состоящего из сферических объектов затруднительно. С целью предотвращения ошибок

триангуляции была изменена форма моделируемых объектов на цилиндрическую.

В связи с этим для проведения эксперимента выбраны элементы цилиндрической формы ($\varnothing = 10$ мм, $h=10$ мм) из различных материалов: полимерный – парафин марки Т1 и имитатор растворимого компонента гетерогенной смеси – стальные цилиндры. В реальной гетерогенной смеси, предназначенной для получения пористой удаляемой модели, значения плотности и поверхностной твердости растворимых компонентов в несколько раз превышают значения этих характеристик у воскообразных компонентов. В связи с этим считаем, что стальные цилиндры, используемые в эксперименте, не деформируются и служат для передачи энергии прессования полимерным компонентам смеси. С целью визуализации процесса деформирования порошкового тела производим в пресс-форме с прозрачной стенкой. Пресс-форма достаточно жесткая, чтобы обеспечить сопротивление нагрузке, возникающей на этапе пластической деформации всего объема порошкового тела. Прессование вертикальное, одностороннее, как показано на рис.2.

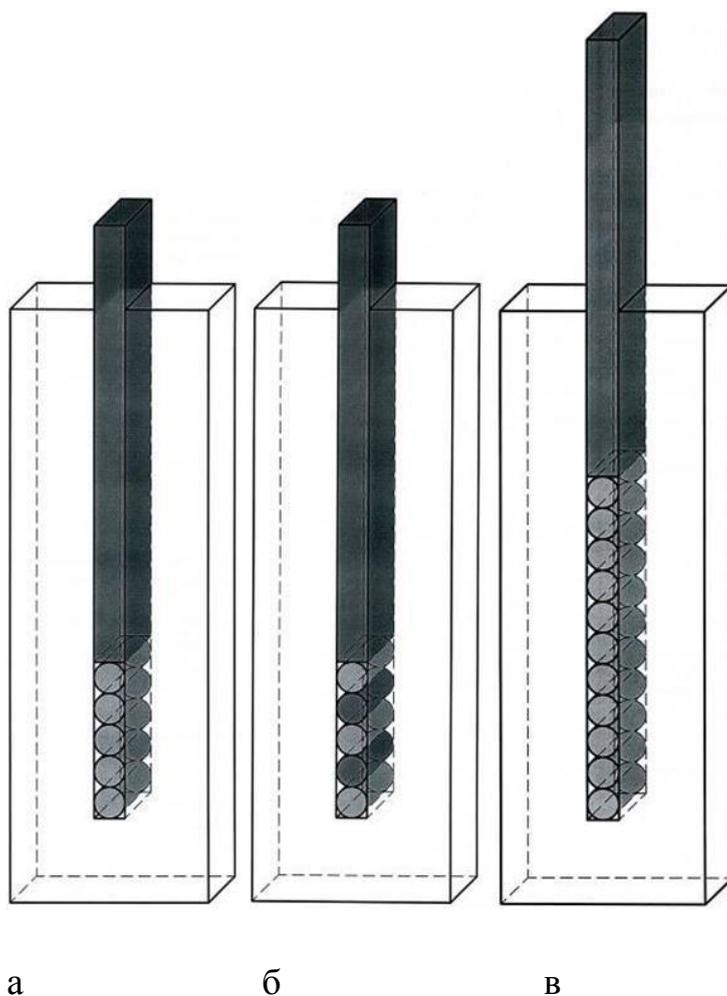


Рис.2. Варианты размещения элементов в пресс-форме: а – 5 цилиндров из парафина Т1; б – поочередное размещение парафиновых (светлых) и стальных (темных) цилиндров; в – размещение 11 парафиновых цилиндров, имитирующих получение протяженной прессы.

В результате математического расчета и натурального эксперимента построены зависимости нагрузки (кН) от деформации (%), которые возникают в порошковом теле в ходе перемещения пуансона пресс-формы. Начальная стадия эксперимента имитирует достижение пуансоном пресс-формы точки, при которой начинается пластическая деформация всего объема уплотняемого тела. Важным представляется сравнение данных, полученных в ходе математического расчета и натурального исследования, характерных для напряженно-деформированного состояния третьей стадии

уплотнения порошкового тела. Деформации при таком нагружении необратимы.

Пластическую деформацию порошкового тела, состоящего из дисперсного полимерного материала, возникающую при его уплотнении можно считать большой. При уплотнении такого тела на стадии $\varepsilon \geq 20\%$, когда завершается перекомпоновка частиц материала, отмеченная появлением локальных зон их спекания и начинается деформация всего объема уплотненного материала - пластическую деформацию можно считать «развитой», так как такой процесс характеризуется множественным скольжением [14, 15]. На этой стадии тело перестает быть порошковым и деформация некоторое время происходит без значительного роста напряжений.

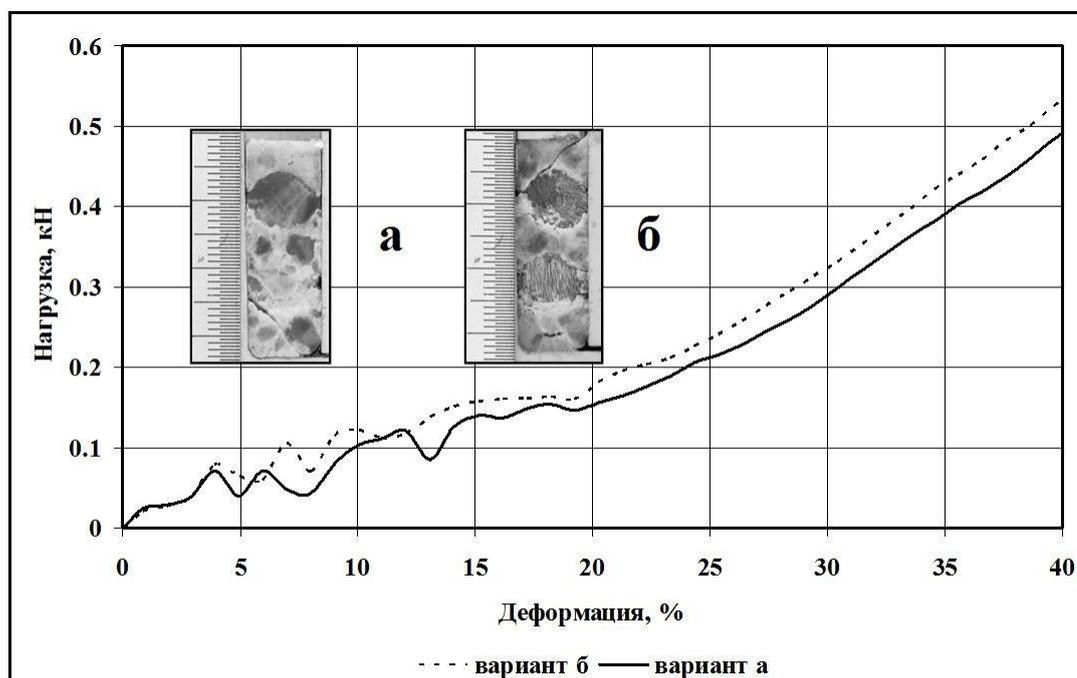


Рис.3. Зависимости нагрузки (кН) от деформации (%) при реальном уплотнении цилиндрических элементов на установке Shimadzu AGX250: а - 5 элементов из парафина Т1; б – поочередное размещение парафиновых и стальных элементов.

На рис. 3 представлены зависимости деформации (%) от сопротивления уплотняемой среды нагрузке (кН), которая возникает во время перемещения пуансона пресс-формы при одностороннем прессовании изотропных и гетерогенных материалов. При реальном деформировании порошкового тела на тестовой машине Shimadzu AGX250 была задана скорость перемещения пресс-пуансона равная 1 мм/с. Представленные на рис. 3 иллюстрации, соответствуют значениям деформации $\varepsilon \leq 40\%$. При этом объемная плотность ($\rho_{об}$) воскообразных компонентов смеси составляет 1,3-1,4 насыпной плотности ($\rho_{нас}$). Насыпная плотность рассматриваемой в эксперименте фракции воскообразного материала составляет $\rho_{нас} \sim 0,6 \text{ кг/м}^3$. Дальнейшее прессование характеризуется интенсивным увеличением сопротивлению прессования при относительно небольших перемещениях пуансона пресс-формы во всех рассматриваемых случаях.

Из рис. 3 видно, что в диапазоне значений деформации $0\% \leq \varepsilon \leq 40\%$ существенных различий по величине нагрузки при уплотнении рассматриваемых систем не наблюдается. На рис.3 представлен внешний вид уплотняемых систем при $\varepsilon \approx 20\%$. Видно, что деформация, разрушение и уплотнение части полимерных элементов происходят одинаково. Для варианта «б» размещения элементов в пресс-форме после значений деформации $\varepsilon \leq 40\%$ величина нагрузки существенно выше, чем для варианта «а». Рост деформации для варианта «б» незначителен.

Однако, при сравнении результатов математического расчета с экспериментальными данными, различия в величинах нагрузки и деформации, представленные на рис.4, становятся более заметными. Так, рост деформации для вариантов «а» и «б» размещения элементов в пресс-форме завершается по достижении $\varepsilon \approx 26,5\%$ и $\varepsilon \approx 37,2\%$ соответственно. При анализе зависимостей, представленных на рис.3 следует учесть, что в ходе математического расчета уплотняемая среда воспринимается как

сплошной материал с однородными свойствами, поэтому расчет для варианта «б» проведен только для деформации нижнего элемента. На рис.4 визуальны отражены этапы виртуального уплотнения элементов, полученные в ходе математического расчета, по вариантам размещения «а» и «б» характерные для начала (слева) и завершения (справа) процесса деформирования.

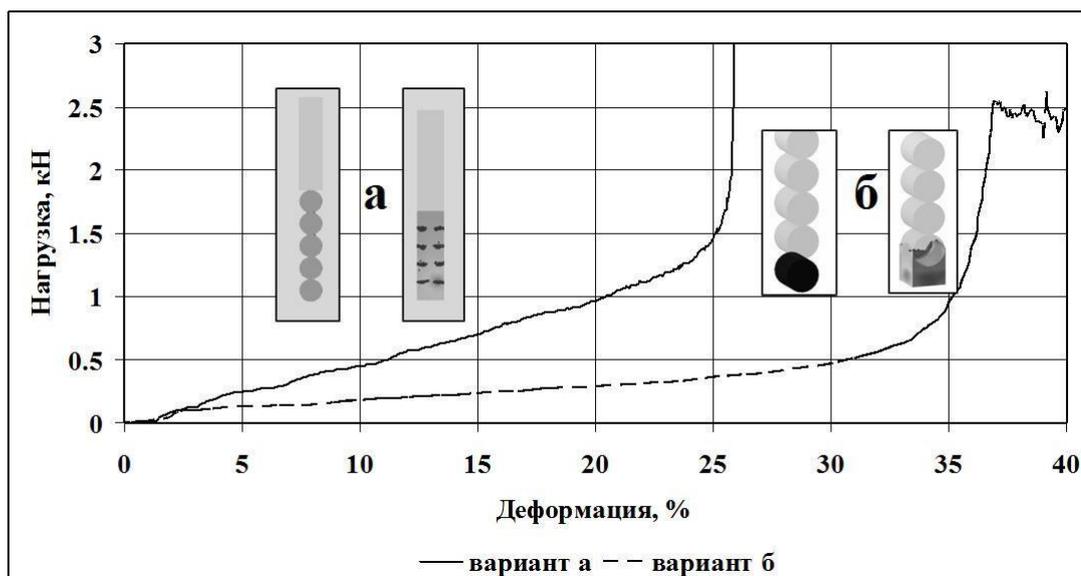
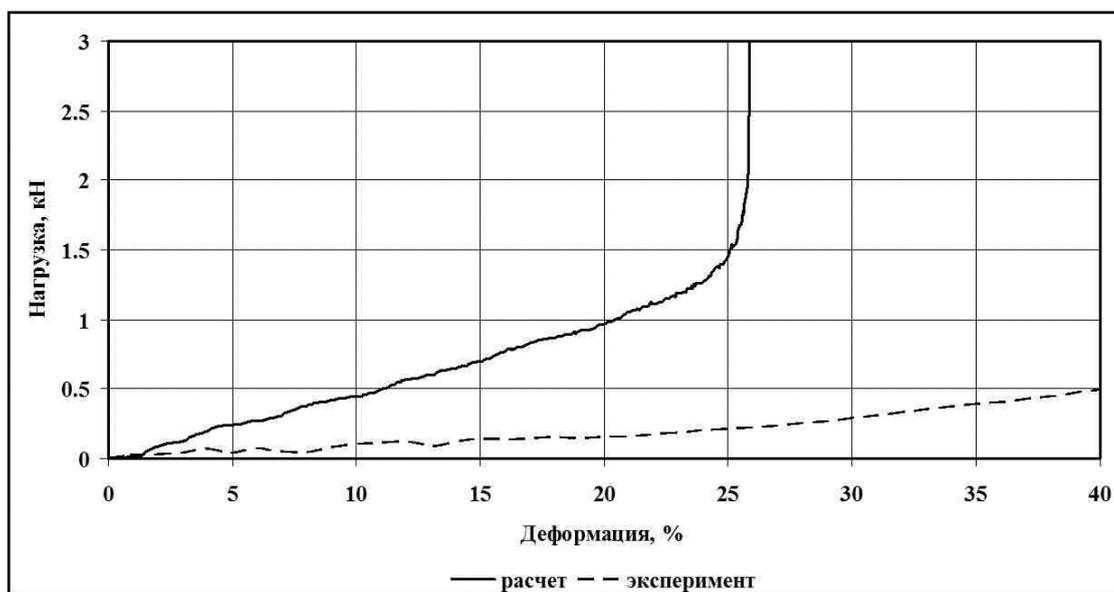


Рис.4. Расчетные зависимости нагрузки (кН) от деформации (%) при виртуальном эксперименте по уплотнению цилиндрических элементов для «а» и «б» вариантов размещения элементов в пресс-форме.

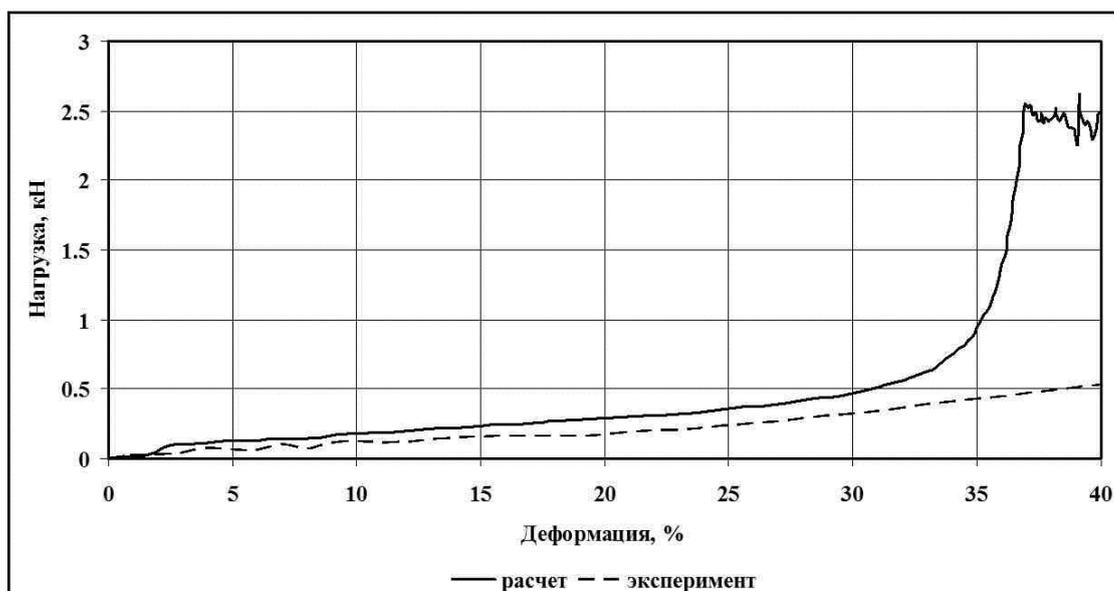
Серия сравнительных зависимостей нагрузки от деформации, полученных в ходе расчета и натурального эксперимента для «а» и «б» вариантов размещения элементов представлены на рис.5,а и рис.5,б соответственно. Из рис.5,а видно, что различия в значениях нагрузки и деформации расчетного и натурального экспериментов значительны уже на начальном этапе уплотнения, в то время как при уплотнении по варианту «б» (рис.5,б) существенные отличия появляются только на этапе, соответствующем $\epsilon \geq 32\%$.

Зависимости нагрузки от деформации при одноосном деформировании длинномерного порошкового тела, состоящего из цилиндрических полимерных элементов по варианту «в» размещения в пресс-форме представлены на рис.6.

На графическом поле рис.6 представлены начальные и соответствующие $0\% \leq \varepsilon \leq 27\%$ стадии расчетного и натурального деформирования полимерных элементов. Видно, что рост значений деформации при виртуальном эксперименте прекращается при $\varepsilon \approx 27\%$, в то время, как реальная деформация продолжается до $\varepsilon \approx 40\%$. Из анализа рис.6 очевидно, что различия в результатах расчетного и натурального экспериментов значительны уже на этапе, соответствующем деформации $\varepsilon \geq 7\%$, что объясняется, предположительно, отсутствием возможности учета пор в элементах уплотняемого тела при расчетном эксперименте, а также наличием зазоров между последними и стенками пресс-формы в натурном эксперименте.



а



б

Рис.5. Зависимости нагрузки (кН) от деформации (%) при расчетном и натурном экспериментах по уплотнению цилиндрических элементов для «а» и «б» вариантов размещения элементов в пресс-форме.

При одноосном уплотнении порошковых тел с отношением длины прессовки к ширине основания не превышающим 5 установлено:

- в ходе реального эксперимента различий по нагрузке в диапазоне значений деформации $0\% \leq \epsilon \leq 40\%$ не наблюдается. Это справедливо для прессовок, состоящих как из однородных элементов, так и из элементов различной плотности.

- совпадение результатов расчета и натурального эксперимента при оценке напряженно-деформированного состояния прессовок достигается лишь в ряде случаев.

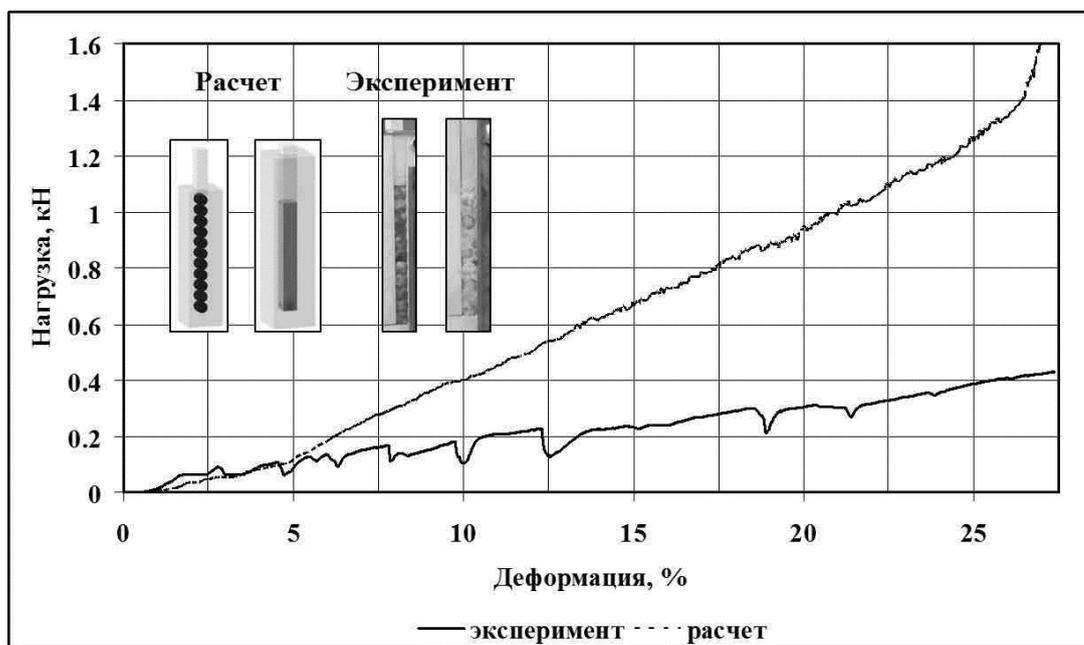


Рис.6. Зависимости нагрузки (кН) от деформации (%) при расчетном и натурном экспериментах по уплотнению цилиндрических элементов для «в» варианта размещения элементов в пресс-форме.

Использование метода конечных элементов для моделирования процессов обработки материалов давлением с целью прогнозирования напряженно-деформированного состояния прессовок из порошков полимерных модельных композиций возможно:

- для описания этапов одноосного уплотнения длинномерных порошковых тел с отношением длины прессовки к ширине основания большим 10, соответствующих малым деформациям;
- для этапов одноосного уплотнения порошковых тел с отношением длины прессовки к ширине основания равным 1 в интервале значений $0\% \leq \varepsilon \leq 30\%$.

3. Экспериментальные исследования пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций

3.1 Методы экспериментальных исследований

Реализации целей и задач исследования в качестве уплотняемого порошкового тела были выбраны 2 воскообразных материала, относящийся к 1 классификационной группе [8, с.119]. Первый представляет собой парафин марки Т1 (по ГОСТ 23683-89. Парафины нефтяные твердые. Технические условия). Т1 имеет плотность при свободной заливке $0,86 \text{ г/см}^3$ с учетом распределенной пористости). Второй - ПС 50/50, представляющий собой двухкомпонентную композицию с равным содержанием парафина и стеарина (по ГОСТ 6484-96. Кислота стеариновая техническая. Технические условия), полученную их сплавлением. В производственной практике стеарин сплавляют с парафином для улучшения его реологических характеристик, а именно пластичность и прочность. Интересным представляется факт образования эвтектического сплава ПС 50/50 с температурой плавления отличной от температур плавления ее составляющих. Температуры плавления определялись с помощью дифференциально-термического анализатора Shimadzu DTG-60H в ходе нагрева материалов со скоростью $2 \text{ }^{\circ}\text{C/мин}$ и составили для Т1 60°C , для стеарина 58°C , а для сплава ПС 50/50 52°C . Материалы Т1 и легкоплавкий ПС50/50 использовались в эксперименте в виде фракций хлопьевидной формы, полученной рассевом ситовым методом с использованием сит модели 026 по ГОСТ 29234.3-91 «Пески формовочные. Метод определения среднего размера зерна и коэффициента однородности». Предварительными экспериментами установлен технологически допустимый диапазон размеров частиц воскообразного компонента, составляющий $0,63 \div 2,5 \text{ мм}$ [9]. Применение фракции менее $0,63 \text{ мм}$ технологически нецелесообразно ввиду незначительного количества материала, остающегося на ситах после отсева. Применение фракции материала более $2,5 \text{ мм}$ не позволяет осуществить операцию заполнения

протяженных поднутрений пресс-матрицы, формирующей выплавляемую модель. На рис.1,а и рис.1,б представлен внешний вид сплава ПС 50/50 фракций 0,63 мм и 2,5 мм соответственно. Отмеченные выше эвтектические свойства сплава ПС 50/50 подтверждаются не только меньшей температурой плавления относительно температур его компонентов, но и меньшей величиной усадки. На рис.1,в представлена стеклянная колба, заполненная сплавом ПС 50/50 с усадочной раковинной.



а

б

в

Рис.3.1. Внешний вид фракций материала ПС 50/50 и усадочной раковины.

Объемную усадку сплавов на основе Т1 и стеарина определяли следующим образом: в колбу с внутренним объемом 60 см³ заливали (до верхней кромки колбы) разогретый до 60 °С расплав воскообразного материала, содержащий стеарин и парафин в диапазоне 0÷100% по массе; колбу с расплавом охлаждали до температуры 20 °С и после погружения в тарированный сосуд с водой определяли величину объемной усадки по количеству вытесненной воды. На рис.2 представлена зависимость объемной усадки воскообразного сплава с диапазоном содержания стеарина и парафина 0÷100% по массе.

На рис.2 0% содержания парафина соответствует 100% содержания стеарина. Из рис.2 видно, что объемная усадка эвтектического легкоплавкого материала ПС 50/50 и композиции ПС 80/20 составляет немногим более 4%. Таким образом, предположительно, равные значения упругого отклика для

парафина и ПС 50/50 достигаются при различных скоростях перемещения пресс-пуансона и, следовательно, различных скоростях экструзии. Это утверждение нуждается в экспериментальной проверке

Экспериментальная часть исследования осуществлялась при помощи тестовой машины AG-Xplus фирмы SHIMADZU. Тестовая машина обеспечивает отклонение от задаваемого значения нагрузки в интервале $0 \div 100$ кН не более 0,03% [10, с.6]. На рабочий стол машины устанавливалась пресс-матрица 1 (графическое поле рис.3), выполненная из стали, что позволяет осуществлять регистрацию нагрузки пренебрегая деформацией материала пресс-матрицы, считая ее упругим телом. Пресс-матрица имеет цилиндрическую внутреннюю поверхность с диаметром 45 мм. Донная часть пресс-матрицы снабжена крышкой 2 с мундштуком, как показано на рис.3. Конструкции крышки и мундштука позволяет обеспечить условие затрудненного выдавливания пластифицирующегося материала. Внутренний диаметр мундштука составляет 9 мм, что обеспечивает отношение площадей сечений деформируемой порошковой композиции и получаемой длинномерной прессовки 25 к 1. Такое отношение площадей гарантированно обеспечивает экструзию материала, претерпевшего нагрузку в ходе уплотнения, при котором происходит его пластификация. В пресс-матрицу помещали порошок модельной композиции 4 и при перемещении пресс-пуансона 3 осуществляли ее выдавливание из мундштука. Скорость перемещения пресс-пуансона в каждом эксперименте оставалась постоянной, но изменялась в ходе серии экспериментов в интервале значений $0,25 \div 1,5$ мм/с.

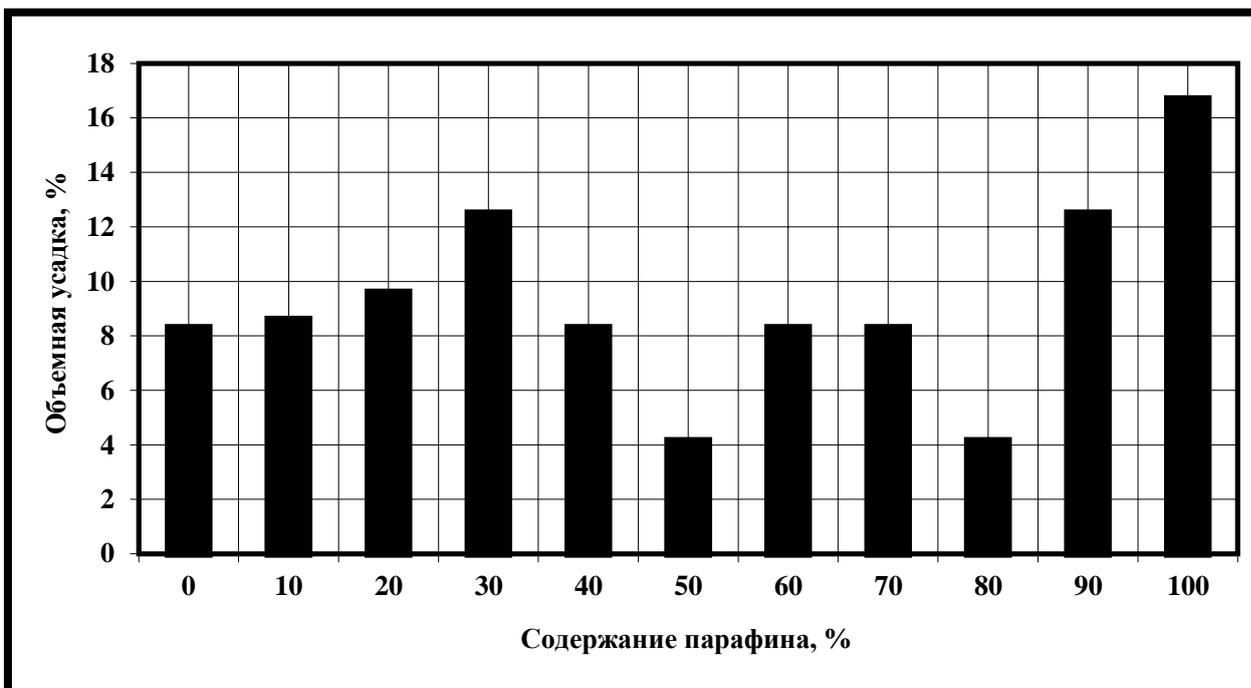


Рис.3.2. Объемная усадка воскообразного сплава.

В процессе получения длинномерной прессовки из воскообразного материала можно выделить следующие этапы:

- уплотнение материала в пресс-матрице, в ходе которого при перемещении пресс-пуансона происходит увеличение нагрузки;
- ламинарное истечение уплотненного материала, при котором начинается экструзия уплотненной воскообразной модельной массы из мундштука пресс-матрицы (характеризуется пиковым значением нагрузки);
- турбулентное истечение пластифицированного материала (поскольку в нашем случае скорость перемещения пресс-пуансона в каждом отдельном эксперименте не изменялась, то эта стадия не исследовалась).

Традиционное графическое отображение напряженно-деформированного состояния нагружаемого объекта в координатах «напряжение-деформация» в нашем случае использовать некорректно. При изменяющейся нагрузке (в ходе экструзии пластифицированного воскообразного материала через мундштук) и постоянной скорости перемещения пресс-пуансона корректно рассматривать систему в осях координат «нагрузка-перемещение».

В ходе предварительных экспериментов, проведенных при помощи описанного выше устройства, установлена предпочтительная скорость перемещения пресс-пуансона 0,5 мм/с при выдавливании материала Т1 фракции 0,63 мм [6, с.30-31], которая позволяет обеспечить минимальные значения упругого отклика длинномерной прессовки. Такая скорость перемещения пресс-пуансона обеспечивает фактическую скорость экструзии воскообразного материала равную 12 мм/с. На рис. 3 представлены зависимости нагрузки, возникающей на пресс-пуансоне от его перемещения при формировании длинномерной прессовки из материалов Т1 и ПС 50/50 фракций 0,63 и 2,5 мм через мундштук (диффузор).

Из рис.3 видно, что при одинаковых скоростях перемещения пресс-пуансона в процессе выдавливания воскообразных материалов, возникающие нагрузки существенно отличаются и зависят как от фракции материала, так и от его состава. Например, для модельной массы ПС 50/50 фракции 0,63 мм при скорости экструзии 12 мм/с величина нагрузки составляет 20 кН. Нагрузка, возникающая при экструзии эвтектического материала ПС 50/50 в среднем на 32 – 35 % меньше, чем в случае с Т1. При этом участки зависимостей, характеризующих изменение нагрузки от перемещения на стадии выдавливания ПС 50/50, отклоняются от параллельности оси абсцисс в большей мере, чем при выдавливании Т1. Такое падение нагрузки свидетельствует о протекании процесса плавления ПС 50/50 в ходе экструзии и неверном выборе ее скорости.

С увеличением скорости перемещения пресс-пуансона до 1,5 мм/с скорость экструзии возрастает до 36 мм/с, а значение нагрузки увеличивается более чем на 25 % и составляет 25 кН. Аналогично для других материалов. При увеличении скорости перемещения пресс-пуансона до 1,5 мм/с пластификация Т1 фракции 0,63 мм происходит при величине нагрузки на 30% большей, чем при уплотнении со скоростью перемещения пресс-пуансона 0,5 мм/с. В случае с материалами Т1 и ПС 50/50 фракции 2,5 мм увеличение нагрузки составляет 6%, и 8% соответственно. После начала

экструзии происходит незначительное падение нагрузки и выход на стационарный режим выдавливания. На этом этапе для всех исследуемых воскообразных материалов разница в величинах нагрузок, соответствующих началу пластификации и выходу на стационарный режим, не превышает 10%.

Неправильный выбор скорости перемещения пресс-пуансона и, следовательно, скорости экструзии материала, неизменно должно сопровождаться нарушением геометрии получаемой длинномерной прессовки в виде усадки материала при его остывании или упругом отклике после релаксации.

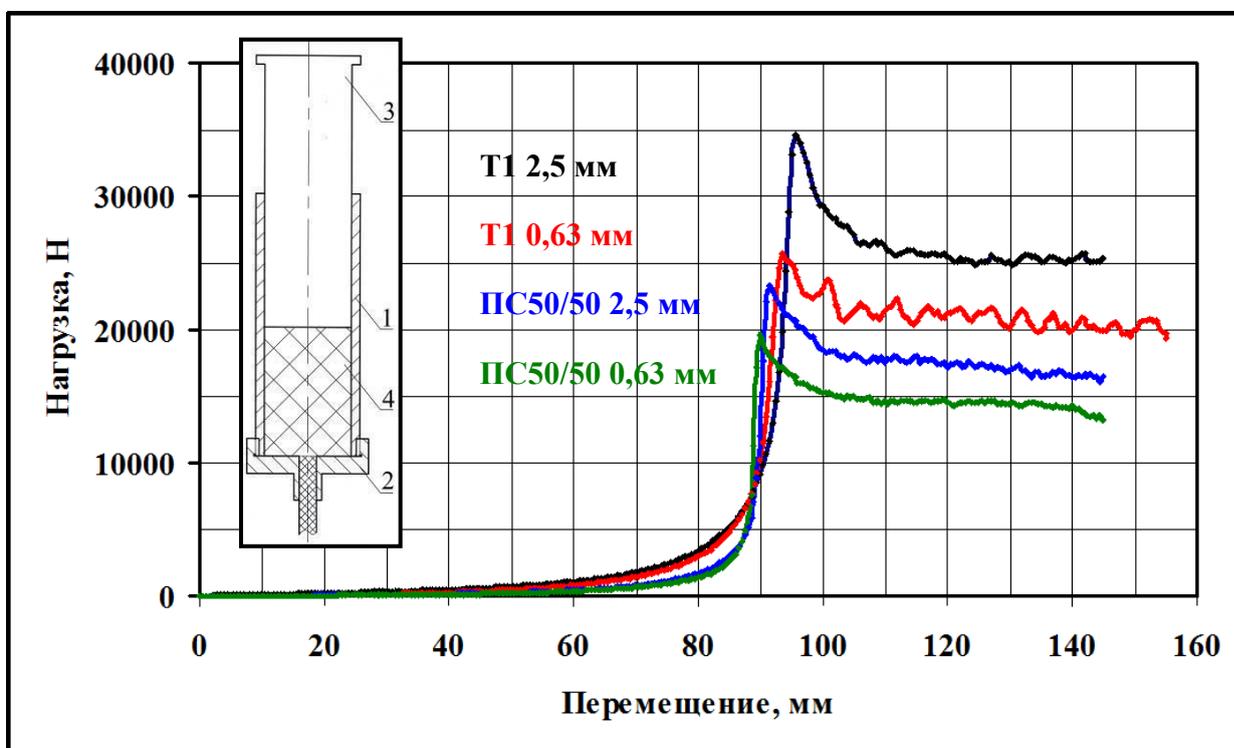


Рис. 3.3. Зависимость нагрузки от перемещения при скорости экструзии 12 мм/с и схема экструзии модельной композиции через мундштук: 1 – цилиндрическая пресс-матрица; 2 – крышка с мундштуком; 3 – пресс-пуансон.

Фиксация геометрических параметров осуществляли через каждые 50 мм по длине получаемой прессовки при помощи цифрового регистратора DIN 863 Vogel, обеспечивающего точность измерения 0,001 мм. Отклонение

значений диаметров прессовки в местах измерений от внутреннего диаметра мундштука в положительную или отрицательную сторону позволяет регистрировать упругий отклик или усадку материала. Величину таких отклонений можно определить по формуле:

$$O = ((A_m - A_n) / A_n) \cdot 100\%,$$

где O – величина отклонения, %; A_m и A_n – контролируемые размеры внутреннего диаметра мундштука и внешнего диаметра длинномерной прессовки соответственно, мм.

На рис. 4 приведены средние значения отклонений размеров длинномерных прессовок круглого сечения, сформированных при мундштучном выдавливании в зависимости от скорости экструзии, фракции и вида воскообразного материала.

Из рис.4 видно, что скорость перемещения пресс-пуансона в значительной степени влияет на значение скорости экструзии, при которой, в свою очередь, создаются различные теплофизические условия формирования длинномерной прессовки, определяющие величину отклонения ее диаметра от внутреннего размера формообразующего мундштука.

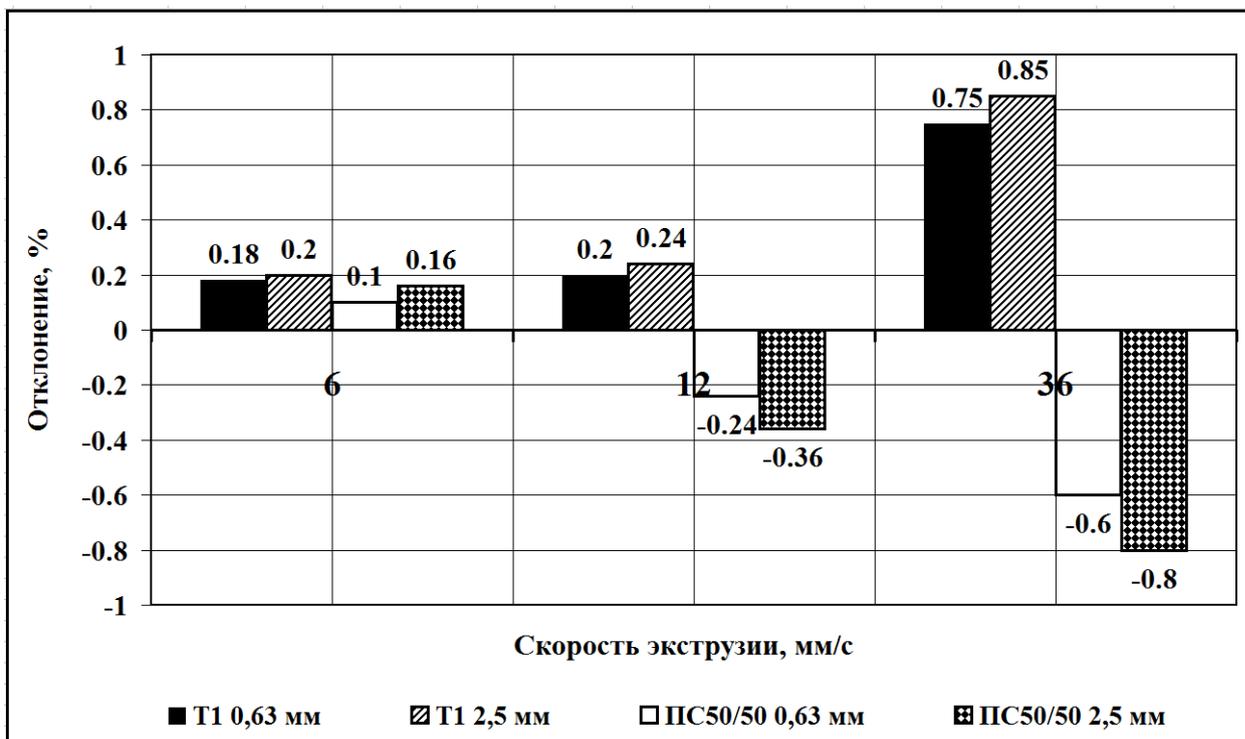


Рис. 3.4. Зависимость отклонений размеров длинномерной прессовки от скорости экструзии воскообразных материалов через мундштук.

Видно, что для материала T1 наиболее технологически приемлемой является скорость диффузии, соответствующая 6 мм/с. Увеличение скорости диффузии T1 приводит к значительному росту отклонения размеров прессовки от внутренних размеров мундштука, а снижение скорости существенно не влияет геометрические показатели получаемой прессовки. Для более легкоплавкого материала PC 50/50 скорость экструзии более 6 мм/с является неприемлемой вследствие локального нагрева материала до температур, вызывающих усадочные явления в длинномерной прессовке после ее охлаждения. При получении изделий в пресс-матрицах с конструкцией, предполагающей совмещение образующих частей форм, фракция влияет на размерно-геометрические параметры и качество поверхности изделия и, безусловно, оказывает влияние на формирование теплофизических условий его получения. Однако, как видно из рис.4, фракция используемого материала, при формировании длинномерной

прессовки выдавливанием, в целом, оказывает меньшее влияние, чем скорость экструзии и реологические свойства материала.

Таким образом, можно сделать вывод, что для всех исследуемых материалов с увеличением фракции выдавливаемого материала и (или) скорости перемещения пресс-пунсона нагрузка, создаваемой на нем возрастает. Для получения прогнозируемых размеров длинномерной прессовки выдавливанием воскообразного компонента решающее значение имеет химический состав материала, определяющий теплофизические условия формирования прессовки.

Полученные в ходе исследования экспериментальные данные позволяют регулированием скорости экструзии, в зависимости от используемого модельного материала, получать в процессе его уплотнения протяженные элементы прессовок с минимальными отклонениями от формообразующих размеров мундштука, что позволит значительно повысить размерно-геометрическую точность конечных изделий.

3.3 Материально-техническое обеспечение экспериментальных исследований значений упругого отклика

Идеализированный процесс уплотнения порошковых материалов выражается зависимостью плотности прессовки от давления прессования и характеризуется основными стадиями. Первая - интенсивное уплотнение порошка, связанное со свободным неравномерным перемещением частиц под действием внешних сил, сопровождающееся разрушением «арок» - структурная деформация порошкового тела. Вторая стадия характеризуется максимально плотной упаковкой частиц порошка, сопротивляющихся сжатию, при котором давление прессования возрастает, плотность некоторое время не увеличивается, а пластическая деформация в приконтактной зоне носит ограниченный локальный характер. Когда давление прессования превышает сопротивление сжатию частиц порошка, пластическая

деформация охватывает весь объем каждой частицы, смещение межчастичных контактов прекращается и они фиксируются.

На практике, при прессовании порошков происходит взаимное наложение стадий порошкового тела, протекающих одновременно. Деформация отдельных частиц начинается при малых давлениях прессования (например: порошка модельной массы ПС50/50, содержащим равное количество парафина и стеарина), в то время как скольжение некоторых частиц наблюдается и при высоких давлениях. Поэтому преимущественное значение для уплотнения порошка имеет перемещение частиц на первой стадии (чем пластичнее материал, тем при более низких давлениях начинается уплотнение, связанное с деформацией частиц). Для материалов с относительно высоким пределом текучести начальная и конечная стадии уплотнения резко разграничены.

Равномерность физико-механических свойств в объеме прессовки, состоящей, в данном случае, из двух компонентов зависит от пропорционально равного их удельного содержания в каждом участке подвергающейся прессованию гетерогенной смеси. Распределение компонентов в гетерогенной смеси происходит преимущественно на второй стадии прессования, при этом равномерное их расположение локализует очаги деформации полимерного компонента в окрестности более плотного компонента смеси, что позволит получить равномерный упругий отклик сформированной системы после извлечения из пресс-матрицы.

Для проведения натурального эксперимента выбраны различные по плотности материалы шаровидной формы ($\varnothing = 10$ мм): полимерный – парафин марки Т1 и имитатор растворимого компонента гетерогенной смеси – стальные шары. Считаем, что стальные шары, используемые в данном эксперименте, не деформируются и служат для передачи энергии прессования полимерным компонентам смеси. Компоненты гетерогенной смеси располагались в пресс-форме в один слой (рис.3.5). Начальная стадия

уплотнения представленной системы имеет кубическую упаковку ее компонентов в пресс-матрице.

На рис. 2 и 3 представлены диаграммы значений сил (Н) и перемещений (мм) пресс-пуансона при одностороннем прессовании гетерогенных материалов со скоростью 0,5 мм/с и 3 мм/с соответственно. При этом диаграммы, визуализируют этапы прессования, соответствующие завершению второй стадии описанного выше идеализированного процесса, при которой достигается кубическая упаковка элементов, а деформация в приконтактной зоне сферических элементов системы носит ограниченно-локальный характер. Завершение этой стадии представляется весьма условным и, в общем случае, иллюстрирует фактическое распределение элементов в системе, после которого начинается пластическое течение воскообразного компонента. Представленные на рис. 2 и 3. иллюстрации, соответствуют перемещениям пресс-пуансона 35 мм (т.е. ~40% от начальной высоты упаковки компонентов в пресс-форме), при которых объемная плотность ($\rho_{об}$) воскообразных компонентов смеси составляет 1,3-1,4 насыпной плотности ($\rho_{нас}$). При этом насыпная плотность рассматриваемой в эксперименте фракции воскообразного материала составляет $\rho_{нас} \sim 0,5 \text{ кг/м}^3$. Дальнейшее прессование характеризуется интенсивным увеличением сопротивления прессования при относительно небольших перемещениях пресс-пуансона во всех рассматриваемых случаях.

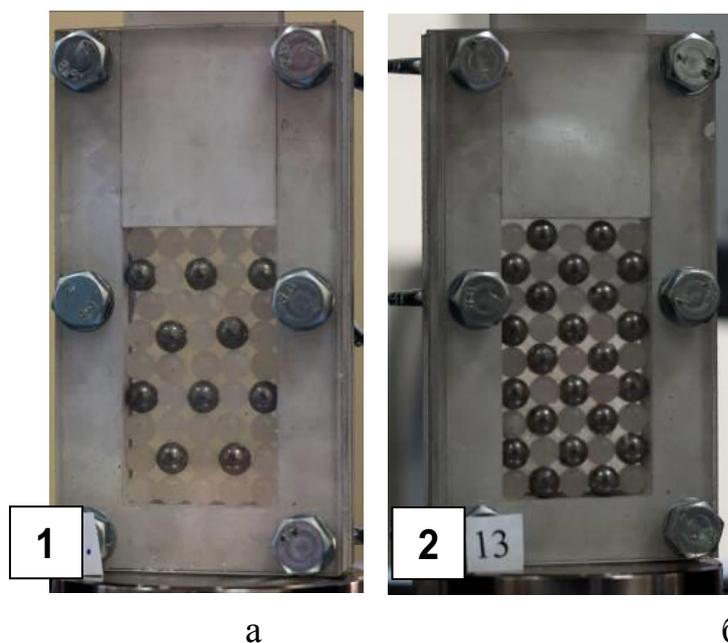


Рис. 3.5. Варианты расположения компонентов в деформируемом слое: а – вариант 1; б – вариант 2.

Анализ полученных зависимостей (рис. 2) показывает, что вторая стадия при скорости прессования 0,5 мм/с (т.е. $\sim 0,55\%/с$ от начальной высоты материала в пресс-матрице) более выражена в МК с 50% содержанием недеформирующихся элементов (рис.1,б). Внешний вид прессовок, соответствующий 40%-му их деформированию показывает, что распределение твердого компонента в случае с 25% (рис. 3.5, а) его содержанием в системе представляется менее упорядоченным.

Для зависимостей, представленных на рис.3, полученных при перемещении пресс-пуансона со скоростью 3 мм/с, характерно незначительное расхождение значений до момента, соответствующего 30% деформации уплотняемой системы. В этот момент в прессовке плотность повышается фронтально, в направлении от пресс-пуансона к нижним слоям. Стадия максимального уплотнения компонентов системы завершается и начинается деформация ее воскообразных элементов во всем объеме прессовки. При этом различие зависимостей перемещений от силы прессования у различных вариантов размещения элементов в прессовке увеличивается. Очевидно, что для деформирования элементов системы с

большей плотностью (т.е. по варианту 2) затрачиваются более значительные усилия. Скорость прессования, равная 3 мм/с, является технологическим порогом. Ее превышение не позволяет получить прессовку с равномерным упругим откликом.

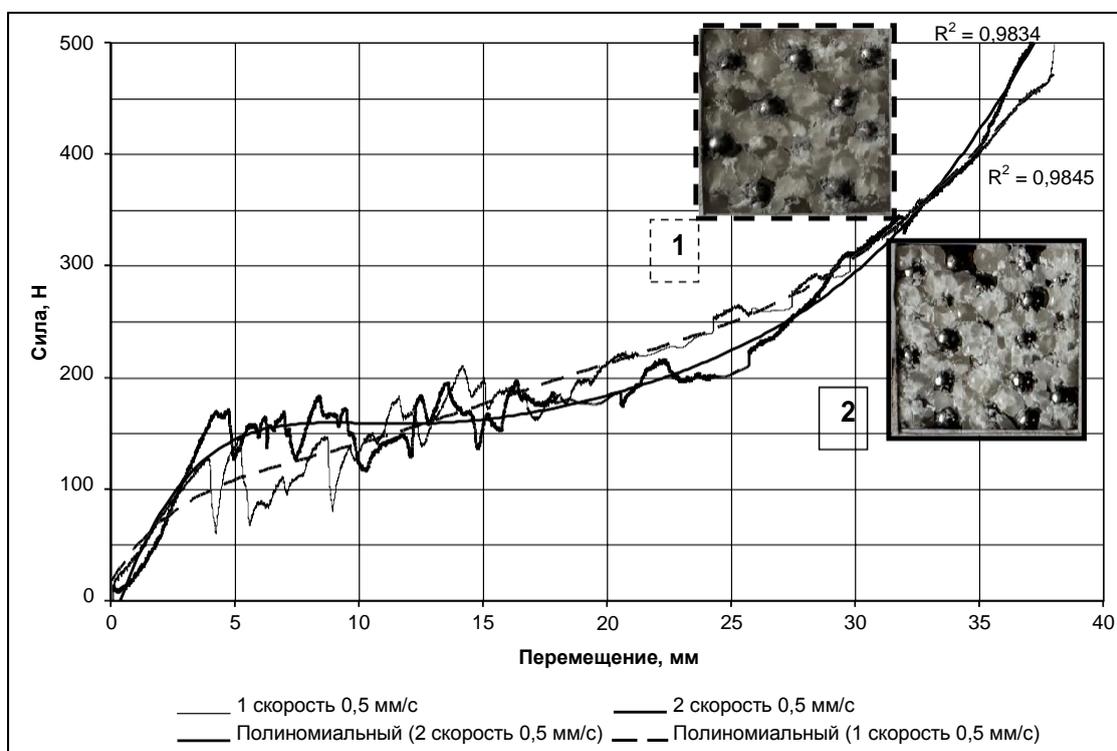


Рис. 3.6. Зависимость перемещения (мм) от силы (Н) пресс-пуансона при одностороннем прессовании со скоростью 0,5 мм/с: 1- вариант 1 по рис.3.5,а; 2 вариант 2 по рис.3.5,б.

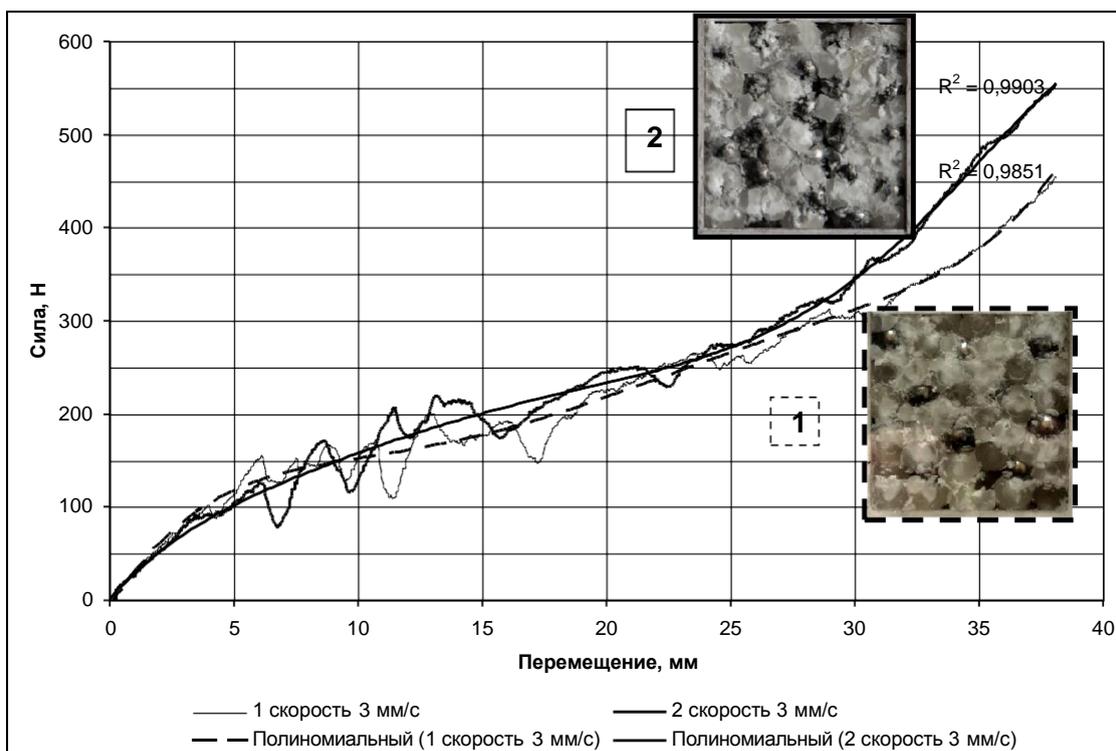


Рис. 3.7. Зависимость перемещения (мм) от силы (Н) пресс-пуансона при одностороннем прессовании со скоростью 3 мм/с: 1- вариант 1 по рис.3.5,а; 2 вариант 2 по рис.3.5,б.

Таким образом, завершение второй классической стадии уплотнения прессовки при различных вариантах начальной плотности систем и скоростей уплотнения различны. Технологически оптимальным представляется вариант распределения элементов в уплотняемой системе, при котором удельная плотность в любом участке прессовки одинакова по завершении 2-ой стадии уплотнения. Оценка влияния начальной плотности гетерогенной системы (т.е. различных вариантов содержания разноплотностных элементов) на завершение 2-ой стадии прессования представляется важной. На рис.4 представлены результаты сравнительного анализа абсолютных значений усилий прессования гетерогенных систем по вариантам 1 и 2 (см. рис.3.5) с итерацией значений перемещения равным 5 мм. Левая часть каждого значения представляет абсолютную разницу сил при скорости 0,5 мм/с (по рис.2) и скорости 3 мм/с (по рис.3.7) соответственно.

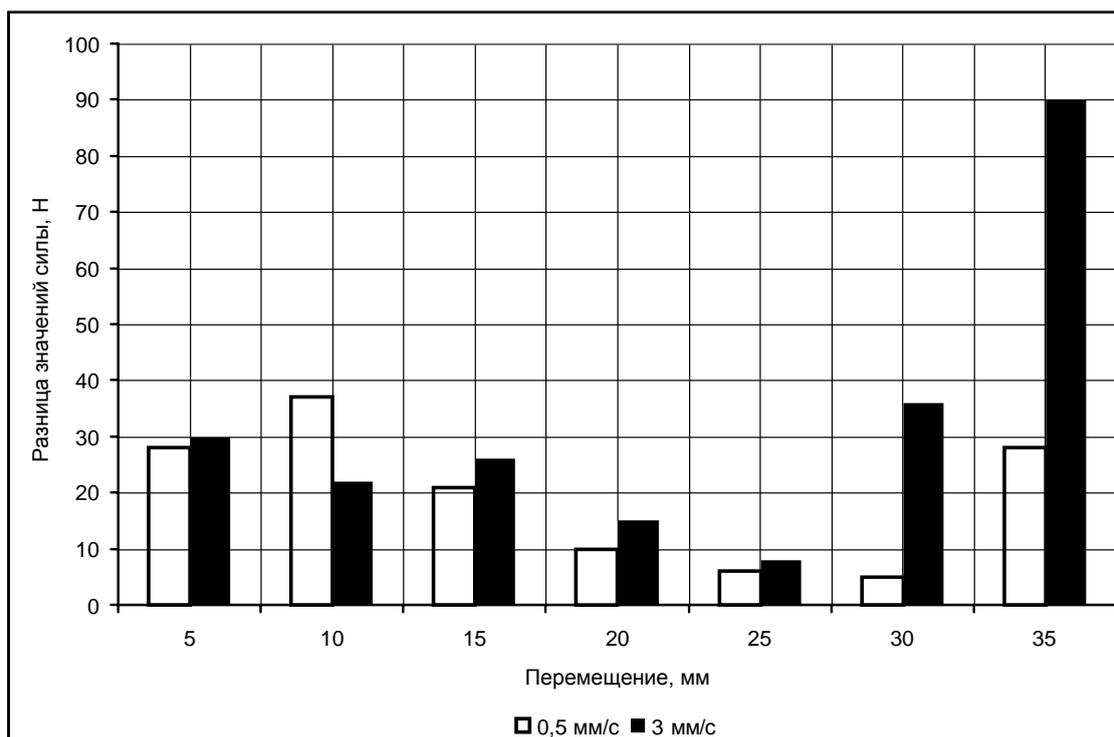


Рис.3.8. Расхождение абсолютных значений сил при прессовании гетерогенных систем по вариантам 1 и 2 при скорости 0,5 мм/с (слева) и 3 мм/с (справа).

Из рис. 3.8 видно, что при 30-40%-ом деформировании системы (т.е. в условиях данного эксперимента при перемещении пресс-пуансона более чем на 30 мм) различия в усилиях прессования становятся значительными. При увеличении скорости перемещения пресс-пуансона происходит дестабилизация распределения плотности в уплотняющейся гетерогенной системе.

Таким образом, на равномерность упругого отклика уплотняемой гетерогенной системы при начальной изотропности системы оказывают влияние: соотношение разноплотностных компонентов в системе и скорость прессования. Прессование гетерогенной порошковой системы с высоким содержанием упругих элементов рекомендуется при понижении скорости ее деформирования с целью достижения равномерного распределения плотности. Такой подход позволяет получить прессовку с равномерным

упругим откликом, прогнозировать и учитывать ее размерную точность при проектировании пресс-оснастки.

3.4 Регрессионный анализ зависимости Кольрауша для пористых прессовок из воскообразных порошковых композиций

В качестве модельного материала используют, как правило, полимерные воскообразные композиции на основе парафина и стеарина.

Для таких выплавляемых моделей характерна рассредоточенная по всему объему пористость. Процесс порообразования в модели саморегулирующийся, поэтому плотность различных участков составляет 80–97 % от плотности составляющих ее полимерных компонентов в «литом» состоянии. Плотность прессовки зависит от прилагаемого давления. Пластические свойства порошков модельного материала существенно влияют на их способность воспроизводить конфигурацию модели и на размерно-геометрические характеристики последней. При получении пористой модели сложной конфигурации прессованием возникает неравномерное распределение свойств в объеме прессовки, что делает прогноз плотности на различных участках модели затруднительным. Так, например, плотность массивных участков прессовок значительно ниже, чем тонких частей.

Важным при получении прессовки является отсутствие внешнего проявления размерно-геометрических дефектов, связанных с упругим последствием материала модели, возникающим вследствие его переуплотнения. Для получения прессовок с сопоставимыми размерами сторон достаточно уплотнить модельный материал до плотности на 10–12 % меньшей, чем плотность этого материала в «литом» состоянии.

Экспериментально установлено, что при формировании прессовки из дисперсного полимерного материала наибольшая плотность достигается в зонах, расположенных непосредственно под пресс-пуансоном, согласно

схеме на рис. 3.5. Получение прессовки с прогнозируемым 1 Пат. РФ № 2188735. Способ изготовления выплавляемых моделей / Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Костина Т.В., Некрасов С.А. Оpubл. 10.09.2002. Бюл. № 25; Пат. РФ № 2227769. Способ изготовления удаляемых моделей / Сапченко И.Г., Жилин С.Г. Оpubл. 27.04.2004. Бюл. № 12. распределением плотности и напряжений в ее объеме позволило бы повысить точность определения величины упругого отклика на каждом участке прессовки.

Для прогнозирования механических свойств выплавляемых моделей сложной конфигурации в процессе их прессования необходимо выбрать математическую модель уплотнения порошкового материала, которая бы описывала зависимость уплотнения от приложенного давления. В качестве такого закона было использовано безразмерное логарифмическое уравнение, содержащее две константы материала, одна из которых тождественно равна единице. Целью работы является определение параметров логарифмического уравнения прессования для описания процесса одноосного уплотнения порошкового тела из полимерного материала. В рамках поставленной цели решались следующие задачи:

- определение максимально достижимой плотности материала прессовки в условиях одноосного вертикального нагружения в жесткой матрице;
- определение константы выбранного уравнения прессования порошкового полимерного материала;
- получение кривой аппроксимации, построенной по результатам эксперимента.

В качестве полимерного компонента модельной массы в работе использовали парафин марки Т1. Плотность очищенного парафина при 15 °С варьируется в пределах 0,881–0,905 г/см³ [14]. С целью определения его плотности в «литом» состоянии свободной заливкой расплава парафина при температуре выше 60 °С в цилиндрическую емкость

диаметром 72,6 мм и высотой 270 мм получили цилиндр с усадочной раковинной. После отсечения части цилиндра с усадкой по-

лучили конечную высоту образца – 170 мм. «Литая» плотность используемого парафина составила 0,860 г/см³.

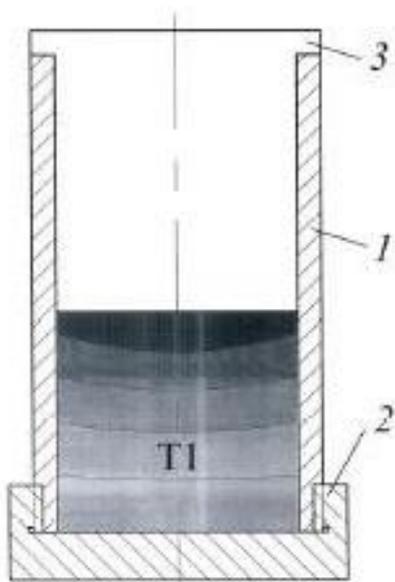


Рис. 3.9. Схема одноосного прессования с распределением плотности материала в прессовке после уплотнения: 1 – жесткая пресс-матрица; 2 – нижняя крышка; 3 – пресс-пуансон

Экспериментальное исследование поведения модельного материала при прессовании выполнялось в жесткой цилиндрической пресс матрице, выполненной из стали Ст45 (см. рис. 3.9). Ее внутренний диаметр составляет 50,15 мм, толщина стенки 4 мм. Нагрузка прикладывалась при помощи универсальной испытательной машины ShimadzuAG-Xplus. Температура воздуха в помещении составляла 21 °С. С целью визуализации распределения полимерного материала в ходе прессования его слои последовательно засыпались в прессформу, разделяемые слоями графитового порошка, размер фракции которого составлял 10 % от фракции полимерного материала. На рис. 3.10 представлены сечения прессовок в диаметральной плоскости, полученные при одноосном уплотнении порошкового тела со скоростью 1 мм/с (рис. 3.10, а) и при квазистатическом уплотнении (рис. 3.10, б).

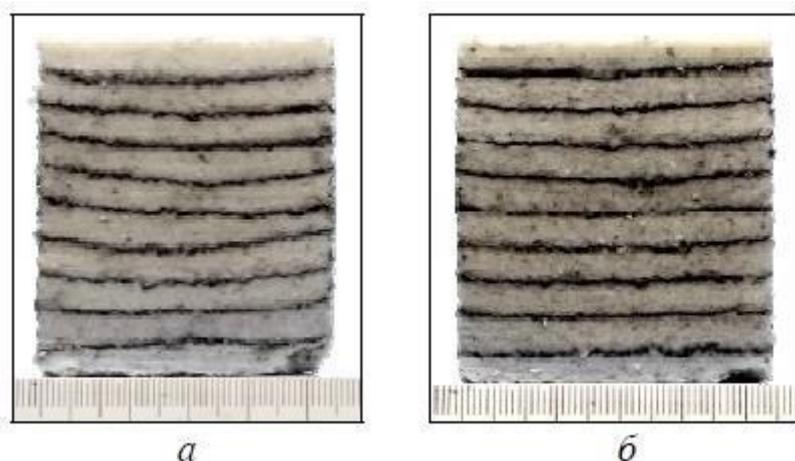


Рис. 3.10. Сечения прессовок в диаметральной плоскости, полученные при одноосном прессовании порошкового тела при скорости прессования 1 мм/с (а) и в квазистатическом режиме (б)

Видно, что при квазистатическом режиме уплотнения достигается более равномерное уплотнение слоев материала. Дальнейшие эксперименты проводились в квазистатическом режиме. Прессовка из однородного полимерного материала выдерживалась при заданном давлении в течение нескольких часов, до полного перераспределения напряжений внутри пористого тела и прекращения движения пресспуансона. Затем прессовка вынималась из пресс-формы и измерялась ее плотность.

Для описания процесса уплотнения полимерной композиции будем использовать безразмерное двухпараметрическое уравнение прессования. Уравнение зависимости относительной плотности прессовки от давления прессования имеет вид

$$\rho = b \cdot \ln P + a, \quad (3.1)$$

где ρ – текущая плотность прессовки, отнесенная к теоретической (максимально достижимой) плотности материала, т.е. плотность в долях единицы, P – относительное (безразмерное) давление прессования P – текущее размерное значение давления; $crit P$ – критическое давление прессования, при котором достигается теоретическая плотность.

Константа a равна относительной плотности прессовки при $P = 1$, следовательно, $a = 1$. Константа b характеризует способность пористого материала уплотняться под действием приложенного давления прессования. Для изучаемой полимерной композиции она определялась в результате серии экспериментов. В ходе экспериментальных исследований установлено, что теоретическая плотность парафина марки Т1 составляет 0,912 г/см³, соответствующее критическое давление 5 МПа. При значениях давления прессования больших, чем 5 МПа, плотность более не увеличивалась, деформирование происходило в упругой стадии. Логарифмическое уравнение аппроксимации строилось таким образом, чтобы получить меньшую погрешность в диапазоне технологически обоснованных давлений прессования, которые обеспечивают плотность прессовки, близкую к плотности в «литом» состоянии. Она составляет 0,860 г/см³, или 0,943 в относительных величинах (т.е. пористость в «литом» состоянии составляет 5,7 %). Для этого давление прессования варьировалось в диапазоне от 0,1 до 0,6 МПа. В результате указанных нагрузок относительная плотность изменялась от 0,70 до 0,98 соответственно, или 74,2 и 104 % от «литой» плотности.

Константа b безразмерного логарифмического уравнения оказалась равной 0,0218. Тогда уравнение прессования исследуемого материала принимает вид

$$\rho = 0,0218 \cdot \ln P + 1. \quad (3.2)$$

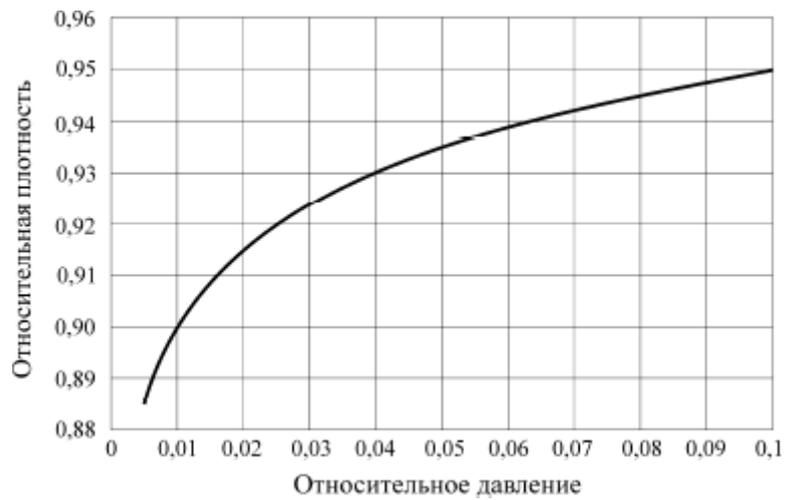


Рис. 3.11. Аппроксимация кривой уплотнения полимерной

На рис. 3 показана кривая аппроксимации (2). Для достижения технологически приемлемой плотности прессовки, состоящей из однородного полимерного материала, достаточным является относительное давление 0,01–0,04.

4. Практическое получение напрессовки пластичного материала на жесткую цилиндрическую основу

Применение технологий получения отливок высокой размерной и геометрической точности высоко востребованы предприятиями машиностроительного комплекса. Однако в условиях дефицита и высокой стоимости шихтовых материалов производство конкурентоспособной литой металлопродукции высокого качества затрудняется. Совмещением процессов алюмотермитного получения стального расплава для питания тела отливки с технологиями литья по пористым прессованным выплавляемым моделям одновременно решается проблема возврата отходов машиностроения (окалины, стружки черных и цветных металлов) в промышленное использование и повышения качества литья [1]. Получение таких отливок в литейной форме за минимальное число операций представляется предпочтительным. Последовательность операций при реализации такого процесса получения стального литья заключается в изготовлении, представленного на рис.1, который помещают в жесткую пресс-матрицу для формирования на поверхности блока слоя из воскообразного модельного состава.

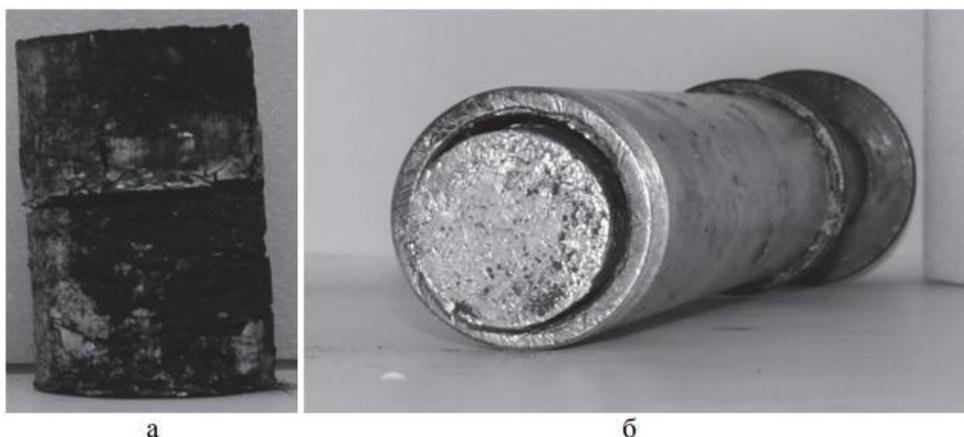


Рис. 1. Блок-основа из термитной шихты: а – послойное формирование элементов блока; б – термитный блок в жесткой пресс-матрице для формирования слоя воскообразного модельного материала

Блок-основу изготавливают прессованием термитной композиции, состоящей из железоалюминиевого термита, ферросплавных примесей, металлической стружки и связующего материала. В качестве модельного состава используется парафин технических марок или воскообразные материалы на его основе: ПС 50/50, ПС 70/30 [6]. В качестве связующего материала используют воскообразный модельный состав, идентичный наносимому на блок-основу. Затем в жесткой прессматрице напрессовывают на блок-основу воскообразные элементы литейной модели. На полученную модель последовательно наносят и сушат слои огнеупорной суспензии, получая, таким образом, неразъемную оболочковую форму, которую, в свою очередь, требуется поместить огнеупорный наполнитель и прокалить. При использовании такого технологического приема операция заливки оболочковой формы расплавом отсутствует. Расплав металла получают активацией экзотермической реакции на открытой поверхности блока-основы поджигом. Образующийся в результате экзотермической реакции расплав фронтально продвигается вниз литейной формы, последовательно заполняя ее, а шлак, являющийся одним из продуктов реакции вытесняется к верхней части оболочковой формы. Преимуществом такого способа производства отливок является реализация возможности получения расплава металла вне традиционных плавильных агрегатов внутри литейной формы, что значительно сокращает трудоемкость процесса. Высокая шероховатость поверхности блока-основы нивелируется нанесением на него воскообразной части модели, конфигурация которой определяется формообразующей полостью жесткой пресс-матрицы. Кроме того, при выполнении выплавляемой модели целиком из модельной композиции уплотнением в пресс-матрице возможно образование релаксационного дефекта в виде упругого отклика, величина которого в различных участках такой прессовки не постоянная и составляет от 0,5 до 5 %. На практике величина упругого отклика материала сокращается регулированием целого ряда параметров: скорости деформирования, температуры, времени выдержки материала под

давлением для завершения релаксационных процессов. При реализации представленного в работе способа достигается снижение величины упругого отклика материала за счет его демпфирования в поры блока-основы при релаксации. При напессовывании воскообразного модельного материала диапазон давлений в дозаторе шприц-машины выбирается исходя из соотношения площади дозатора к суммарной площади сечения элементов будущей модели. Дисперсный состав модельной композиции определяется линейным размером зазоров между формообразующей полостью пресс-матрицы и термитным блоком-основой

Заключение

Экспериментально определены плотность и пористость в состоянии свободной заливки. Получена кривая аппроксимации, построенная по результатам эксперимента уплотнения воскообразного материала. Определено логарифмическое уравнение аппроксимации необратимого уплотнения при прессовании. Таким образом, получен интервал значений давления, при котором плотность воскообразного материала в прессовке будет технологически приемлемой. Практическое значение результатов исследований обусловлено возможностью их применения в реальных производственных условиях для получения металлоизделий повышенной размерной точностью

Список источников

- 1 Буренин А. А. Упругий отклик среды при развитии, остановке и повторном вязкопластическом течении, включая мгновенную разгрузку // Фундаментальные проблемы теоретической и прикладной механики. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, № 4 (5), с. 2043–2044
- 2 Большие пластические деформации и разрушение металлов. Рыбин В. В. М.: Metallurgy, 1986, 224 с.
- 3 Влияние гранулометрического состава и скорости выдавливания воскообразной композиции на геометрию длинномерной прессовки при мундштучном экструдировании: Жилин С.Г., Богданова На., Комаров О.Н. Вестник Чувашского Государственного Педагогического Университета Им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика Предельного Состояния. 2018. № 4 (38). С. 54-64.
- 4 Влияние начальной упаковки компонентов порошкового тела на напряжённо-деформированное состояние прессовки при уплотнении: Жилин С. Г. Ученые Записки Комсомольского-На-Амуре Государственного Технического Университета. 2018. Т. 1. № 3 (35). С. 73-79.
- 5 ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002) Пластмассы. Метод испытания на сжатие, пункт 6.1.1.
- 6 Жилин, С.Г. Определение параметров логарифмического уравнения прессования для описания процесса одноосного уплотнения порошкового тела из полимерного материала: Комаров О.Н., Потянихин Д.А., Соснин А.А. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2016. Том 18, №4. С.48-59
- 7 Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А., Предин В.В. Получение отливок повышенной размерной точности по комбинированным литейным моделям из алюмотермитных и воскообразных смесей // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 11. С. 6-11.

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. – Комсомольск-на-Амуре, 2002. – 218 с. – Библиогр.: с. 92-104

9 Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А. Технология сокращения упругого отклика прессованных выплавляемых моделей для получения отливок повышенной размерной точности // Девятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»: сборник докладов / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. - Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. С.127-129.

10 Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А., Потянихин Д.А. Особенности формирования пористой структуры прессовок из полимерного дисперсного материала // Ученые записки кнэгту, 2016, IV-(28), С. 26-338.

11 Жилин С.Г., Комаров О.Н., Предеин В.В., Потянихин Д.А., Попов А.В. Особенности формирования полимерного слоя на поверхности модельного блока для повышения точности стальных отливок // Девятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»: сборник докладов / Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. - Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. С. 130-132.

12 Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А., Попов А.В. Особенности формирования пористой структуры и разрушения прессовок из полимерных дисперсных материалов // X Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» Екатеринбург, 16-20 мая 2016 г.: сб. Материалов. – Екатеринбург: ИМАШ уро РАН, 2016. - С.42

13 Кульбовский И.К., Карелин С.В., Попов Е.В., Туркин Д.А. Компьютерное моделирование процессов затвердевания и охлаждения

массивных отливок из чугуна в литейной форме // Вестник Брянского государственного технического университета. 2008. № 2. С. 23-26.

14 Капцевич, В.И. Шелег. -Минск: Вышэйшая школа, 1997-163с.

15 Конструкционные порошковые материалы и изделия /Ю. Г. Дорофеев, Л. Г. Мариненко, В. И. Устименко.- М.: Металлургия, 1986-144с.

16 Литье по выплавляемым моделям/ Под. общ. ред. В.А. Озерова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1994. – 448 с.

17 Литье по выплавляемым моделям/ Под общ. ред. В.А. Озерова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1994. – 448 с.

18 Медведев Я.И., Валисовский И.В. Технологические испытания формовочных материалов. – Москва: Машиностроение. – 1973. – 312 с.

19 Моделирование процессов обработки материалов давлением на основе оценки напряженно-деформированного состояния прессовок из полимерных модельных композиций с использованием метода конечных элементов. Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А. Вестник Пермского Национального Исследовательского Политехнического Университета. Машиностроение, Материаловедение. 2017. Т. 19. № 2. С. 48-66.

20 Материаловедение и технологические процессы в машиностроении: Назаратин В.В. Технология изготовления стальных отливок ответственного назначения. М.: Машиностроение, 2006. - 234 с: ил.

21 Особенности формирования слоя воскообразного материала при напрессовке на пористую твердую основу: Богданова Н.А., Назаров Б.М., Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А.// В Сборнике: Фундаментальная Механика В Качестве Основы Совершенствования Промышленных Технологий, Технических Устройств И Конструкций Материалы Докладов ІІІ Дальневосточной Школы-Семинара. Ответственный Редактор А.И. Евстигнеев. 2018. С. 10-12.

22 Особенности напряженно-деформированного состояния прессовок из воскообразного материала при изменении начальной упаковки компонентов: Богданова Н.А., Назаров Б.М., Жилин С.П, Комаров О.Н. В

Сборнике: фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении материалы V Дальневосточной конференции с международным участием. Ответственный Редактор А.И. Евстигнеев. 2018. С. 63-68.

23 Особенности формирования пористой структуры прессовок из полимерного дисперсного материала: Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А., Потянихин Д.А. Ученые Записки Комсомольского-На-Амуре Государственного Технического Университета. 2016. Т. 1. № 4 (28). С. 26-33.

24 Основы порошковой металлургии /Г. А. Лебенсон. -2-е изд., перераб. и доп.-М.:Металлургия, 1987.-208с.

25 Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали ГОСТ 1050-88

26 Парафины нефтяные твердые. Технические условия. ГОСТ 23683-89.

27 Пористые порошковые материалы и изделия из них / П.А.Витязь,В.М.

28 Порошковые стали и изделия/ С. С. Ермаков, Н. Ф. Вязников.-4-е изд., перераб. И доп.-Л.:Машиностроение. Ленингр. отд -ние, 1990.-319с.

29 Порошковая металлургия: учебник для техникумов/ С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. -3-е изд, перераб. И доп.-М.: Металлургия, 1991.-431с.

30 Пластическая деформация конструкционных материалов/ отв. ред. А. Ф. Пименов.-М.:Наука, 1988.-272с.

31 Порошковая металлургия и напыленные покрытия: учебник для втузов/ под. ред. Б. С. Митина. –М.: Металлургия, 1987.-792с.

32 Процессы изостатического прессования/ под. ред. П. Дж. Джеймса; пер. с англ. И. П. Папинова, А. М. Хомутова. –М.: Металлургия, 1990.-192с.

33 Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Управление структурой и свойствами пористых комбинированных удаляемых моделей. - Владивосток, Дальнаука, 2007. 138 с.

34 Сапченко И.Г., Некрасов С.А., Жилин С.Г., Штерн М.В. Напряженно-деформированное состояние оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям // Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2005. 156 с.

35 Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А. Особенности формирования и разрушения прессовок из полимерного порошкового материала // Успехи механики сплошных сред. Сборник докладов Международной конференции, приуроченной к 75-летию академика В.А. Левина. Россия, Иркутск, ООО "Мегапринт". 2014. С. 428-432

36 Сушко Т.И., Бучнев А.В., Турищев В.В., Пашнева Т.В. Моделирование процессов затвердевания крупногабаритной стальной корпусной отливки с совершенствованием технологии изготовления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 12. С. 44-47.

37 Современные машиностроительные материалы и заготовки: учебное пособие для вузов/ В. А. Рогов, Г. Г Позняк. –М.: Академия, 2008.- 330с.

38 Технология конструкционных материалов и материаловедение: учебник для вузов / М. Е. Дриц, М. А. Москаль.-М.: Высшая школа, 1990.- 448с.

39 Технология металлов и материаловедение / Б. В. Кнорозов, Л. Ф. Усова, А. В. Третьяков и др.; под ред. Л. Ф. Усовой. –М.: Металлургия, 1987ю-800с.

40 Учебное пособие для вузов /С. И. Богодухов, А. Д. Проскурин, Р. М. Сулейманов, А. Г. Схиртладзе; под общ. ред. С. И. Богодухова.-Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2010.-559с.

41 Формирование Протяженной Прессовки В Условиях Нестационарного Теплового Режимы При Мундштучном Уплотнении Полимерного Материала *Жилин С.Г., Комаров О.Н., Соснин А.А., Потянихин Д.А.* В Сборнике: *Фундаментальная Механика В Качестве Основы Совершенствования Промышленных Технологий, Технических Устройств И Конструкций Материалы Іі Дальневосточной Школы-Семинара.* Редколлегия: А.И. Евстигнеев (Отв. Ред.) [И Др.]. 2017. С. 12-14.

42 Формирование Прессовок из порошков полимерных изотропных материалов. *Жилин С. Г., Сапченко И. Г., Комаров О.Н.* Вестник Чувашского Государственного Педагогического Университета Им. И.Я. Яковлева. Серия: *Механика Предельного Состояния.* 2016. № 2 (28). С. 3-14.

43 Химическая энциклопедия / Редкол.: Кнунянц И.Л. и др.. — М.: Советская энциклопедия, 1992. — Т. 3. — С. 446, 207. — 639 с.

44 Экспериментальное Определение Параметров Регрессионной Зависимости Кольрауша Для Пористых Прессовок Из Воскообразных Порошковых Композиций *Жилин С.Г., Комаров О.Н., Потянихин Д.А., Соснин А.А.* Инженерный Журнал: Наука И Инновации. 2018. № 2 (74). С. 9.