

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

на правах рукописи



**ПОТАПОВ Андрей Алексеевич**

**КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ  
FDM-ПЕЧАТИ ИЗДЕЛИЙ С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

**Диссертация**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Научный руководитель:**  
док. тех. наук, профессор  
Волгин Владимир Мирovich

Тула 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ.....	11
1.1 Традиционные методы изготовления изделий сложной формы .....	11
1.1.1 Механическая обработка .....	12
1.1.2 Прямое прессование.....	14
1.1.3 Литьевое прессование .....	14
1.1.4 Литье под давлением .....	15
1.2 Конструкторско-технологическое обеспечение изделий для традиционных методов обработки .....	18
1.3 Аддитивные технологии изготовления изделий сложной формы .....	20
1.3.1 Методы аддитивных технологий.....	20
1.3.2 Материалы для FDM-печати.....	25
1.4 Особенности конструкторско-технологического обеспечения FDM-печати изделий сложной формы .....	26
1.5 Анализ современных исследований о влиянии параметров процесса FDM- печати на физико-механические характеристики готового изделия .....	31
1.5.1 Диаметр сопла и высота слоя.....	35
1.5.2 Ориентация и угол наклона раstra.....	36
1.5.3 Степень заполнения .....	37
1.5.4 Температура экструзии.....	38
1.6 Анализ современных исследований о влиянии дополнительной обработки изделий, получаемых FDM-печатью.....	39
1.7 Поверхностная постобработка.....	40
1.7.1 Химическая обработка.....	42
1.7.2 Термическая постобработка.....	42
1.8 Объемная постобработка.....	43
1.8.1 Отжиг без ограничения деформаций .....	45
1.8.2 Отжиг с ограничением деформаций.....	48
1.8.3 Отжиг в дисперсной среде .....	49
1.8.4 Отжиг в жесткой форме.....	49

1.8.5 Отжиг в эластичной оболочке.....	50
Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования.....	51
ГЛАВА 2. СТРУКТУРА КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ РЕЖИМОВ FDM-ПЕЧАТИ ИЗДЕЛИЙ С ЗАДАННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ .....	55
2.1 Структура конструкторского обоснования режимов FDM-печати .....	57
2.1.1 Выбор материала для FDM-печати .....	57
2.1.2 Оценка свойств исходного материала.....	58
2.1.3 Улучшение свойств исходного материала .....	62
2.1.4 Формирование конструкции изделия с учетом специфики FDM-печати .....	62
2.1.5 Методы подготовки САД-модели .....	63
2.1.6 Уменьшение массы изделия путем изменения степени заполнения внутреннего объема.....	64
2.2 Структура технологического обоснования режимов FDM-печати.....	66
2.2.1 Обоснование режимов FDM-печати .....	67
2.2.2 Обоснование методов и режимов постобработки .....	68
2.2.3 Оценка величины усадки.....	68
Выводы по главе 2.....	69
ГЛАВА 3. КОНСТРУКТОРСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ FDM-ПЕЧАТИ ИЗДЕЛИЙ С ЗАДАННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ .....	71
3.1 Определение эффективных характеристик материала изделия .....	72
3.2 Определение эффективных характеристик изотропного материала изделия в зависимости от степени заполнения.....	75
3.3 Определение эффективных свойств ортотропного материала изделия в зависимости от степени заполнения.....	81
Выводы по главе 3.....	92
ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ FDM-ПЕЧАТИ ИЗДЕЛИЙ С ЗАДАННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ.....	93
4.1 Планирование факторного эксперимента по влиянию параметров FDM-печати на физико-механические свойства .....	93
4.1.1 Реализация факторного эксперимента .....	94
4.1.2 Обработка полученных результатов факторного эксперимента.....	101

4.2 Исследование влияния постобработки на физико-механические свойства....	118
4.3 Методика экспериментальных исследований .....	119
4.3.1 Материал образцов.....	119
4.3.2 Подготовка образцов и режимы печати.....	120
4.3.3 Термическая постобработка в дисперсионной среде .....	123
4.3.4 Термическая постобработка в форме с давлением .....	124
4.3.5 Комбинированный метод термической постобработки .....	126
4.3.6 Термическая постобработка в вакуумном пакете.....	127
4.3.7 Методы исследований свойств образцов.....	128
4.4 Результаты влияния постобработки на прочностные свойства образцов .....	129
4.5 Результаты влияния постобработки на пористость образцов .....	133
4.6 Результаты влияния постобработки на деформацию образцов .....	136
Выводы по главе 4.....	144
ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ .....	145
5.1 Характеристика изделия .....	146
5.2 Конструкторское обоснование режимов FDM-печати изделия рабочего колеса вентилятора .....	146
5.3 Технологическое обоснование FDM-печати изделия рабочего колеса вентилятора .....	152
5.4 Оценка прочностных параметров рабочего колеса вентилятора экспериментальным методом.....	155
Выводы по главе 5.....	158
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	159
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	180
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	181

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует необходимость в изделиях сложной формы, традиционные технологии изготовления которых характеризуются многооперационностью, низкой эффективностью и большой материалоемкостью. Существующие методы производства такие как литье, обработка давлением, методы механической обработки и т.д. имеют ряд существенных ограничений, особенно при производстве элементов изделий сложной формы. Это приводит к существенному увеличению времени конструкторско-технологической подготовки производства, высокой стоимости технологической оснастки, большому количеству технологических операций, высокой материалоемкости, ограничивает применение полимерных и композиционных материалов.

В последние годы интенсивно развиваются технологии аддитивного производства, позволяющие существенно сократить сроки конструкторско-технологической подготовки производства и уменьшить материалоемкость изделий. Аддитивные технологии, в том числе, 3D-печать позволяют легко адаптироваться под любые задачи и максимально быстро запускать изделия сложной геометрии в производство при минимальных затратах. С точки зрения проектирования, затрат на материалы, легкости внесения изменений в геометрию изделия и отсутствия необходимости в проектировании и изготовлении специализированной оснастки аддитивные технологии обладают неоспоримыми преимуществами перед традиционными методами. Особенно это актуально для мелкосерийного и единичного производства. Аддитивные технологии используются в различных отраслях промышленности: аэрокосмическая промышленность, автомобилестроение и производство по индивидуальным заказам в биомеханике. Среди известных на сегодняшний день методов 3D-печати метод FDM (Fused-Deposition Modeling) является самым популярным в мире благодаря способности легко адаптироваться под любые задачи и максимально быстро запускать изделия сложной геометрии в производство при минимальных

затратах. FDM-печать позволяет изготавливать изделия с разной степенью заполнения, тем самым варьируя массу изделия и физико-механические свойства.

Одной из проблем, ограничивающих реализацию потенциальных возможностей FDM-печати, является отсутствие конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати и постобработки, а также оптимизации конструкций изделий с целью уменьшения их материалоемкости при обеспечении заданных характеристик. В настоящее время так же отсутствуют методики, позволяющие прогнозировать характеристики конечного продукта в зависимости от режимов процесса FDM-печати, что сказывается на эффективности применения данной технологии изготовления в производстве изделий сложной формы. Именно поэтому разработка конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками, включающего разработку и оптимизацию конструкций, выбор материалов, определение технологических схем, режимов печати и последующей дополнительной обработки, является актуальной научно-технической задачей, позволяющей не только решить указанные проблемы, но и расширить область применения FDM-печати.

**Цель работы** – повышение эффективности изготовления изделий с заданными характеристиками путем разработки конструкторско-технологически обоснованных режимов FDM-печати.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Анализ современного состояния технологий производства изделий с заданными характеристиками, возможностей и особенностей метода FDM-печати, методов постобработки.

2. Разработка структуры конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати, обеспечивающих уменьшение материалоемкости изделий при гарантированном обеспечении заданных характеристик.

3. Разработка способа определения фактических значений характеристик изделия с использованием моделей микромеханики, позволяющих определить

эффективные значения физико-механических свойств при различных степенях заполнения в виде аналитических зависимостей.

4. Обоснование рациональных технологических режимов FDM-печати с использованием многофакторного эксперимента в виде нелинейных уравнений регрессии для зависимостей свойств изделия от температуры и скорости печати, а также высоты слоя.

5. Исследование влияния постобработки на физико-механические свойства изделий, изготовленных методом FDM-печати.

6. Применение разработанной структуры конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати при производстве изделий с заданными характеристиками.

7. Использование результатов исследования на производстве и в учебном процессе.

**Объект исследования** – изделия с заданными характеристиками, изготовленные методом FDM-печати.

**Предмет исследования** – конструкция, материал, эффективные свойства материала при различной степени заполнения, режимы печати и методы постобработки, их влияние на физико-механические свойства получаемых изделий.

**Соответствие паспорту специальности** – содержание диссертации соответствует п.5 «Методы проектирования и оптимизации технологических процессов» и п.10 «Цифровые технологические процессы и производства в машиностроении» Паспорта научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки).

**Научная новизна** – состоит в выявлении взаимосвязей и обосновании конструкторско-технологических режимов FDM-печати, позволяющих уменьшить материалоемкость изделий путем оценки достижения заданных характеристик с использованием полученных аналитических и регрессионных зависимостей физико-механических свойств изделий от степени заполнения, температуры, скорости печати и высоты слоя.

**Теоретическая и практическая** значимость заключается в том, что разработана структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками. В результате применения разработанной структуры конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати была оптимизирована конструкция изделия, подобран материал и режимы печати, изготовлены изделия с меньшей массой, удовлетворяющие предъявляемым требованиям. На основе данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, разработаны рекомендации по улучшению физико-механических свойств изделий сложной формы, изготовленных методом FDM-печати.

Полученные результаты использованы при создании инновационных вентиляционных систем в ООО «ИВЕНС», г. Москва и внедрены в образовательный процесс по направлению 15.04.01 «Машиностроение» профиль подготовки «Машины и технологии композиционных и функциональных материалов» по следующим дисциплинам: «Аддитивные технологии», «Проектирование технологической оснастки и инструмента для изготовления изделий из композиционных материалов», «Технология производства технологической оснастки и инструмента для изготовления изделий из композиционных материалов» в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке комитета Тульской области по науке и инноватике в рамках соглашения №10 от 07.09.2022.

**Методология и методы исследования.** Методологическая основа исследования включала эксперимент, анализ и сравнение. Для достижения цели исследования и решения поставленных задач использовалось оборудование, оснащение и инфраструктурные возможности следующих структурных подразделений ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»: лаборатории технологии полимерных материалов и композитов, лаборатории химии композиционных и углеродных материалов, инжинирингового центра «Наукоемкие технологии в машиностроении»:



1. Высокотемпературный принтер для FDM-печати Total Z Anyform 500;
2. Испытательная машина универсальная РЭМ-50-А-0.5-1;
3. Дифференциальный сканирующий калориметр SKZ1052F;
4. Термогравиметрический анализатор SKZ1053;
5. Сушильный шкаф Labtex LT-VO/20;
6. Печь Nabertherm N 41/H;
7. Материалы и компоненты для проведения экспериментальных работ.

Для интерпретации результатов исследований были использованы стандартные методики, материалы научно-технической отечественной и зарубежной литературы.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати, обеспечивающих уменьшение материалоемкости изделий с заданными характеристиками.

2. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния изотропного и ортотропного материалов при разной степени заполнения и полученные в результате моделирования аналитические зависимости эффективных физико-механических свойств от степени заполнения и перекрытия слоев.

3. Установленные путем проведения планируемого многофакторного эксперимента закономерности влияния параметров FDM-печати на физико-механические свойства изделия, выраженные в виде статистически обоснованных уравнений регрессии и позволяющие определять рациональные режимы FDM-печати в зависимости от технических требований к изделию.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния постобработки на физико-механические свойства изделий, изготовленных методом FDM-печати.

5. Результаты экспериментальной проверки эффективности промышленного изделия с заданными характеристиками.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: ВНТК с международным участием «Проблемы и перспективы развития автоматизации технологических

процессов». (Тула, 2023 г.); XIX МНПК «Новые полимерные композиционные материалы». (Нальчик, 2023 г.); III МНПС «Материаловедение и технологии» (MST-III-2023). (Душанбе, Таджикистан, 2023 г.); XV МНТК «Научные технологии в машиностроении» (Москва, 2023 г.); РНТК «Научные технологии в машиностроении» (Тула, 2023 г.); 6. I-я МНПК молодых ученых, аспирантов и студентов «Передовые инженерные школы: материалы, технологии, конструкции» (Пермь, 2023г.); III-я МНПК «Материаловедение, строительство, энергетика, технологии и инжиниринг» ЕЕА-III-2024 (Казань, 2024г.)

**Публикации результатов.** По материалам диссертации опубликовано 14 работ, из них 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России; 4 статьи в изданиях, индексируемых в наукометрических базах данных Web of Science и Scopus; 5 статей в других изданиях и материалах конференций; получено 2 свидетельства на программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы из 161 наименования; общий объем – 181 страница машинописного текста, включая 104 рисунка и 33 таблицы.

Автор выражает благодарность научному руководителю доктору технических наук, профессору кафедры «Электро- и нанотехнологии» Волгину Владимиру Мировичу, а также сотрудникам кафедры ЭиНТ и лаборатории ТПМиК и ХКиУМ за помощь в выполнении диссертационной работы.

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В настоящее время в машиностроении и других отраслях производства наблюдаются тенденции усложнения геометрии, уменьшения массы и размеров изделий, повышения точности размеров и качества поверхности [1]. На рисунке 1 представлена тенденция развития изделий в машиностроении.



Рисунок 1 – Современные тенденции развития изделий в машиностроении

Все чаще встает вопрос о замене металлов и сплавов полимерными материалами и композитами на их основе, обеспечивающими получение заданных характеристик изделий при значительном снижении массы изделий.

При изготовлении изделий в обязательном порядке должны быть обеспечены заданные значения технических характеристик, гарантирующих соответствие изделия его целевому назначению и заданному уровню качества в процессе создания, производства и эксплуатации (прочность, жесткость, мощность, коэффициент полезного действия и т.д.). Общие рекомендации и инструкции по описанию изделий и их характеристик представлены в ГОСТ 53890-2010. [2]

### 1.1 Традиционные методы изготовления изделий сложной формы

*Изделия сложной формы (ИСФ)* характеризуются большим количеством углов, сочленений, разнородных поверхностей и отверстий. Для их изготовления требуется большее количество операций.

Технологичность конструкции оценивают рядом показателей в соответствии с ГОСТ 14.201-83 «Общие правила отработки конструкции изделия на

технологичность» и ГОСТ 14.202-73 «Правила выбора показателей технологичности конструкции изделий». Существует множество традиционных методов производства изделий сложной формы, и каждый из них имеет свои преимущества и недостатки [3-6]. Рассмотрим традиционные методы изготовления изделий сложной формы.

### **1.1.1 Механическая обработка**

Механическая обработка характеризуется обработкой заготовки из различных материалов при помощи механического воздействия различной природы с целью создания по заданным формам и размерам изделия.

Обработка резанием является универсальным методом размерной обработки и поэтому занимает большое место в машиностроении. Обработка резанием осуществляется на металлорежущих станках путём внедрения инструмента в тело заготовки с последующим отделением стружки и образованием новой поверхности. Метод позволяет обрабатывать поверхности деталей различной формы и размеров из конструкционных материалов с высокой точностью и заданной шероховатостью. Он обладает малой энергоёмкостью и высокой производительностью. Вследствие этого обработка резанием является наиболее используемым в промышленности процессом размерной обработки деталей. Рассмотрим на примере станка с ЧПУ. Станок автоматически обрабатывает детали в соответствии с программой обработки. Оператор составляет маршрут процесса обработки, задаёт параметры процесса, траекторию движения и смещение инструмента, вспомогательные функции детали в список программ обработки в соответствии с кодом и форматом программы, заданными станком с ЧПУ, а затем вводит в устройство числового программного управления станка с для автоматической обработки деталей. [7-9]. То есть для обработки детали на станке с ЧПУ необходимо написание управляющей программы (УП), что в случае обработки изделия сложной формы становится достаточно трудоёмким процессом, целиком зависящим от квалификации оператора и используемого программного

обеспечения. В настоящее время существуют разнообразные методики подготовки УП для обработки изделий сложно формы. Например, работа [10] посвящена высокоскоростной обработке изделий сложной формы для аэрокосмической промышленности, которые представляют собой наивысший уровень сложности из-за их геометрических особенностей. Для обработки таких сложных деталей обычно требуется пяти осевая обработка. На рисунке 2 показана геометрия изделий сложной формы для аэрокосмической промышленности.

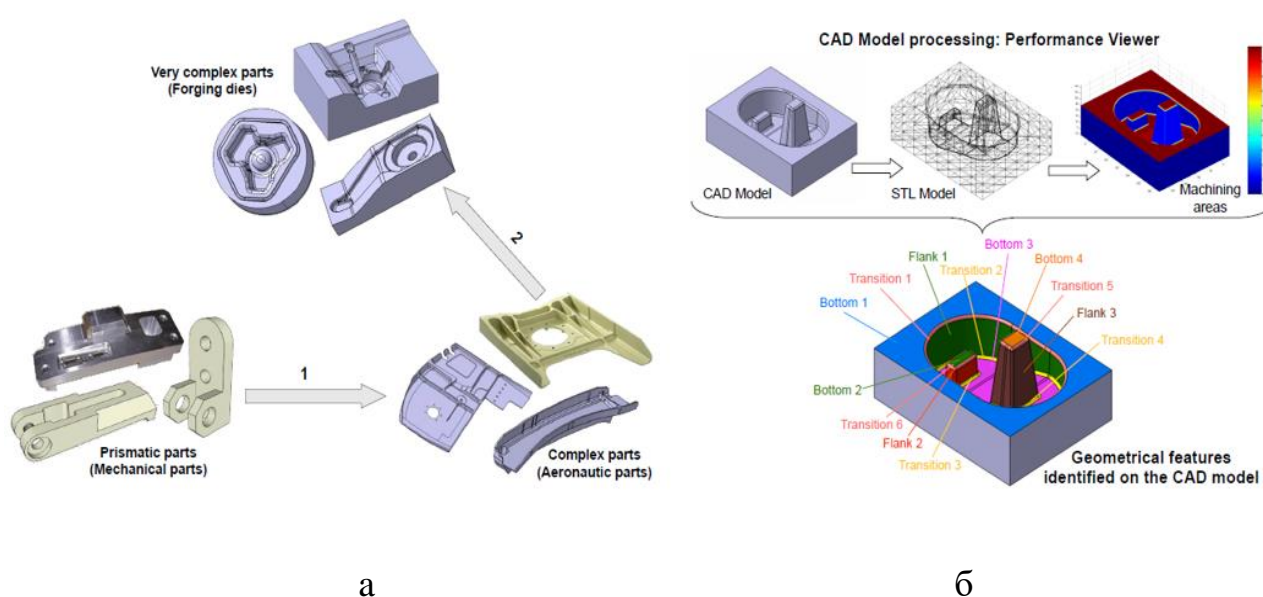


Рисунок 2 – Геометрия изделий сложной формы для аэрокосмической промышленности, где: а – уровень сложности изделий; б - идентификация геометрических объектов [10]

Для изготовления изделий сложной формы механической обработкой требуется наличие дорогостоящего оборудования. Кроме того, как правило, при механической обработке коэффициент использования материала очень низкий.

Кроме механической обработки изделия сложной формы могут изготавливаться также методами, где поверхности изделия формируются в контакте с жесткими элементами формы: прямое прессование, литьевое прессование, литье под давлением [11-13].

### 1.1.2 Прямое прессование

При прямом прессовании материал загружают непосредственно в оформляющую полость пресс-формы — матрицу, где он, нагреваясь, приобретает пластичность. Матрица оформляет наружную поверхность изделия. Давление на загруженный материал передается пуансоном, оформляющим при этом внутреннюю и верхнюю поверхности изделия. Изделие приобретает окончательную форму в момент полного смыкания пуансона и матрицы. Недостатком прямого прессования является сложность получения точных высотных размеров у элементов изделия, оформляемых одновременно пуансоном и матрицей и зависящих от их взаимного положения в конце прессования, которое колеблется в зависимости от точности дозировки прессуемой пластмассы (навески пресс-материала) [14].

### 1.1.3 Литьевое прессование

При литьевом прессовании пресс-форма снабжена загрузочной камерой, откуда материал под давлением пуансона попадает в оформляющую полость сомкнутой пресс-формы по литниковым каналам. Загрузочная камера может быть съемной и устанавливаться на пресс-форму сверху или выполняется конструктивно в самой пресс-форме в виде цилиндра, из которого материалом движением поршня снизу-вверх вытесняется в оформляющую полость. В последнем случае используется пресс с двумя рабочими цилиндрами — верхним для удержания пресс-формы в сомкнутом положении при запрессовке и нижним для привода прессующего поршня [15-17].

Отсутствие отдельной загрузочной камеры в пресс-формах для прямого прессования упрощает их конструкцию и снижает стоимость изготовления. Снижение прочности изделий при литьевом прессовании, особенно для композиционных материалов с длинноволокнистым наполнителем, объясняется также частичным разрушением волокон в момент прохождения через литниковые

каналы и беспорядочной ориентацией их в оформляющей полости пресс-формы [18]. Недостатком литьевого прессования является необходимость в дорогой специальной техоснастке.

Конструкторско-технологические аспекты создания изделий сложной формы из полимерных композиционных материалов рассмотрены в работе [19]. На рисунке 3 представлены изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ).



Рисунок 3 – Изделие из ПКМ [19]

Представленные сведения о проектировании и производстве изделий сложной формы на основе полимерного композиционного материала (углепластика) методом пропитки наполнителя связующим материалом под давлением в замкнутой форме имеют ряд недостатков: для данного метода требуется наличие специального оборудования, дорогой специальной техоснастки.

#### **1.1.4 Литье под давлением**

Метод литья под давлением является наиболее распространенным при переработке большинства промышленных термопластов. К основным

достоинствам литья под давлением относятся: универсальность по видам перерабатываемых материалов; высокая производительность в режиме автоматизированного процесса; высокая точность получаемых изделий; возможность изготовления деталей сложной геометрической формы, недостижимой при использовании других технологий. Метод позволяет формовать изделия массой от долей грамма до десятков килограммов [20-22]. Основными и существенными недостатками данного метода является трудность изготовления специальной оснастки; высокая стоимость пресс-форм.

В таблице 1 представлено сравнение традиционных методов производства изделий сложной формы.

Таблица 1 – Сравнение традиционных методов производства изделий сложной формы

<b>Метод</b>	<b>Особенности</b>	<b>Материал</b>	<b>Достоинства</b>	<b>Недостатки</b>
Механическая обработка	Удаление лишнего материала от заготовки заведомо большего размера	1. Металл 2. Термореактивный материал 3. Термопластичный материалов	1. Изготовление изделий сложной формы 2. Высокая производительность 3. Высокая точность обработки	1. Высокая стоимость оборудования 2. Низкий коэффициент используемого материала 3. Высокие требования к проектированию траектории движения инструмента для станка ЧПУ
Прямое прессование	Формирование негранулированных порошков за счет подплавления. Изделие приобретает окончательную форму в момент полного смыкания пуансона и матрицы	1. Термореактивный материал 2. Термопластичный материалов	1. Прессованием можно получать изделия несложной формы 2. Изготовления изделий с изотропными свойствами 3. Простая конструкция пресс-форм и сравнительно малая стоимость оборудования	1. Низкая производительность 2. Трудность достижения высокого уровня автоматизации (периодический процесс) и прессования изделий сложной конфигурации, с глубокими несквозными отверстиями



<b>Метод</b>	<b>Особенности</b>	<b>Материал</b>	<b>Достоинства</b>	<b>Недостатки</b>
Литьевое прессование	От прямого прессования оно отличается тем, что загрузочная камера (тигель) отделена от формующей полости пресс-формы, а перед заполнением формы пресс-материалом формующая полость находится в замкнутом состоянии	1.Термопластичный материал	1.Возможность изготовления более сложных деталей по сравнению с прямым прессованием 2. Отсутствие больших внутренних напряжений в изделиях 3. Большие точность размеров деталей и срок службы пресс-форм	1. Пресс-формы этого типа сложнее и дороже, чем пресс-формы для прямого прессования
Литье под давлением	Имеет короткий цикл формования, что позволило полностью автоматизировать процесс	1.Термопластичный материал 2. Частично термореактивный материал	1. Изготовление изделий сложной формы 2. Высокая производительность 3. Изготовления изделий с изотропными свойствами	1. Необходимость дорогой специальной техоснастки 2. Высокая стоимость пресс-форм

Анализ традиционных методов производства изделий сложной формы показывает:

1. Механическая обработка позволяет изменять форму и размеры заготовки в соответствии с заданными требованиями и не предполагает изменения свойств исходного материала. Механическая обработка направлена, в большинстве случаев, на обработку металлов и обеспечивает выполнения как простых, так и сложных технологических операций, а также имеет стабильно высокую точность обработки. Основными недостатками механической обработки являются: наличие дорогостоящего оборудования; высокие требования к написанию управляющей программы для станка ЧПУ.

2. Методы производства изделий сложной формы, такие как прессование и литье под давлением, имеют ряд преимуществ по сравнению с механической обработкой в плане более широких возможностей получения изделий сложной формы без многокоординатного оборудования и необходимости проектирования траектории движения инструмента, а также расширения возможности получения изделий из ПКМ. Основным недостатком данных методов является необходимость изготовления специальной техоснастки.

## **1.2 Конструкторско-технологическое обеспечение изделий для традиционных методов обработки**

*Конструкторско-технологическое обеспечение (КТО)* предусматривает взаимосвязанное решение конструкторских и технологических задач, направленных на повышение производительности труда, достижение оптимальных трудовых и материальных затрат и сокращение времени на производство, в том числе и монтаж вне предприятия-изготовителя, техническое обслуживание и ремонт изделия [23-25].

*Конструкторское обеспечение (КО)* создает комплекс конструкторской документации для изготовления и эксплуатации изделия (изделий). Задачей КО является разработка новых видов продукции, совершенствование существующей техники, конструирование специальной оснастки, модернизация производства. Совершенство конструкции детали определяется выполнением требований технологичности, что сводится к возможности ее рационального изготовления с применением прогрессивных технологий формообразования [26-28].

*Технологическое обеспечение (ТО)* обеспечивает необходимую готовность к выпуску продукции надлежащего качества и нужного объема. В ходе технологической подготовки производства разрабатываются и внедряются новые технологии, проводится совершенствование существующей технологии, разрабатывается технологическая оснастка [29].

На рисунке 4 представлена структура конструкторско-технологического обеспечения для традиционных методов производства.

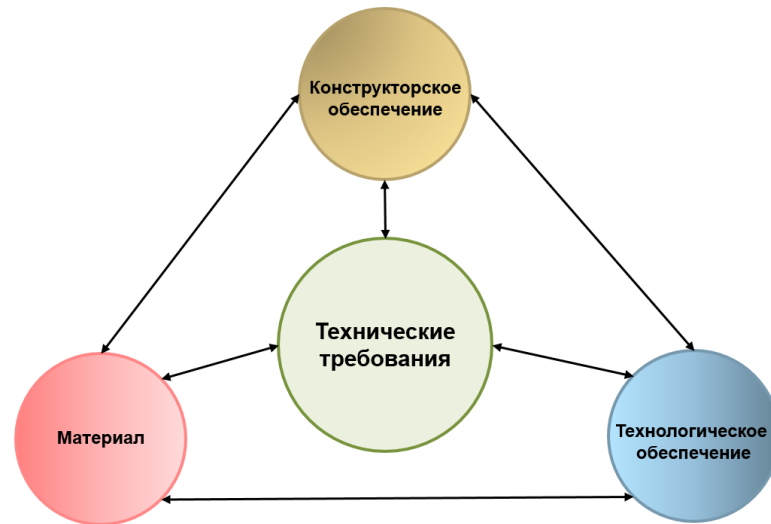


Рисунок 4 – Структура-конструкторско-технологического обеспечения для традиционных методов производства

На рисунке 5 представлены основные этапы процесса конструкторско-технологического обеспечения, реализуемые в ходе производства изделий сложной формы для традиционных методов.

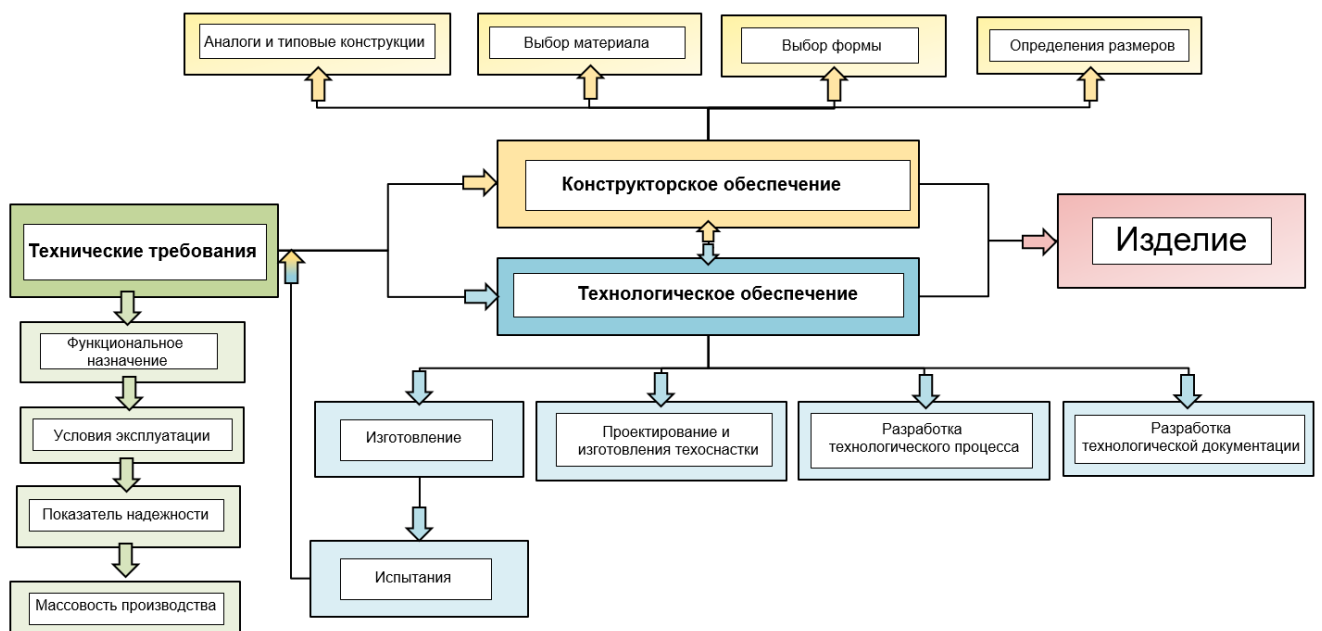


Рисунок 5 – Основные этапы процесса конструкторско-технологического обеспечения, изделий сложной формы для традиционных методов производства

Проанализировав структуру конструкторско-технологического обеспечения изделий сложной формы для традиционных методов производства, можно сделать вывод, что такие методы, как литье, обработка давлением, методы механической обработки имеют ряд существенных ограничений, особенно при производстве изделий сложной формы. Это приводит к большим временным затратам на конструкторско-технологическую подготовку, высокой стоимости технологической оснастки и формующего инструмента, большому количеству технологических операций, ограниченному использованию современных полимерных и композиционных материалов [30,31].

### **1.3 Аддитивные технологии изготовления изделий сложной формы**

В последние годы интенсивно развиваются технологии аддитивного производства (АП), которые позволяют существенно сократить сроки конструкторско-технологической подготовки.

#### **1.3.1 Методы аддитивных технологий**

В настоящее время термином «аддитивное производство» (АП) или «3D-печать» определяется технология, используемая для создания 3D/4D-деталей с помощью послойного нанесения различных материалов: полимеров, металлов, керамики и композиционных материалов. Аддитивные технологии широко используются для изготовления изделий сложной формы, которые затруднительно, а часто и невозможно изготовить с помощью традиционных технологических процессов, в таких отраслях, как аэрокосмическая промышленность, автомобилестроение и биомеханика. В последнее время расширяется применение 3D-печати в химии и смежных с ней отраслях (биохимия, фармацевтика) для создания приборов и материалов, адаптированных для решения конкретных исследовательских задач.

Аддитивные технологии можно подразделить на следующие группы:

струйное нанесение связующего (Binder Jetting); прямой подвод энергии и материала (Directed Energy Deposition); экструзия материала (Material Extrusion), включающая метод Fused-Deposition Modeling (FDM-печать); струйное нанесение материала (Material Jetting); синтез на подложке (Powder Bed Fusion); листовая ламинация (Sheet Lamination); фотополимеризация в ванне (Vat Photopolymerization) [32].

Схема основных методов аддитивных технологий представлена на рисунке 6.

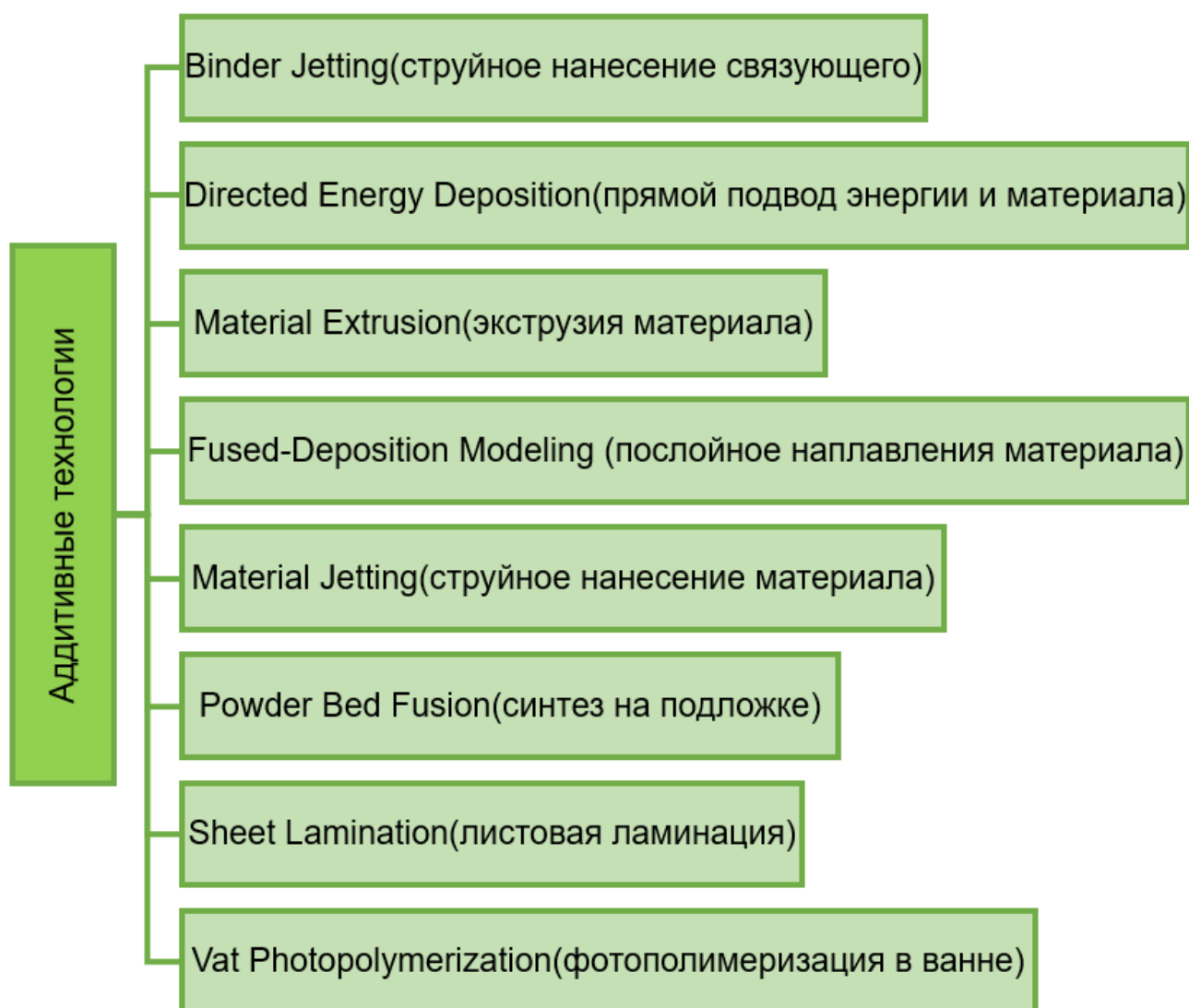


Рисунок 6 – Основные методы аддитивных технологий

Сравнения методов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительная таблица основных методов аддитивных технологий

Методы	Особенность метода	Материал	Достоинства	Недостатки
<b>Binder jetting</b>	Нанесение жидкого связующего, подобно нанесению чернил на бумагу в струйном принтере	1.Керамика; 2.Металлы; 3.Полимеры.	1.Низкая стоимость по сравнению с другими процессами 3D-печати металлами; 2.Возможность печати полноцветных прототипов; 3.Отсутствие деформации при печати.	1.Хрупкость детали в процессе, до термообработки; 2.Высокая пористость моделей, по сравнению с другими методами.
<b>Directed Energy Deposition</b>	Осаждения газопорошковой струи при помощи направленного энергетического воздействия	Металлические порошки или проволока.	1.Изготовление изделий из нескольких материалов.	1.Изготовления тонких стенок; 2.Изготовление сложной формы; 3.Качество поверхности.
<b>Material Extrusion</b>	Сплав материала или густую жидкость выдавливают через сопло и формируют деталь или заготовку	1.Полимерные композиционные материалы; 2.Термопласты; 3.Структурная керамика.	1.Разнообразие материалов; 2.Возможность создавать прототипы, производственные оснастки и небольшие предпроизводственные партии для тестирования и концептуальных моделей.	1.Структура поддержек; 2.Анизотропия; 3.Шероховатость.
<b>Fused-Deposition Modeling</b>	Технология заключается в послойном нанесении расплавленной полимерной нити	Филамент: ABS; PLA;PETG; PA; PBT; PEEK; PEKK; PEKK CF; PP.	1. Доступность; 2.Экономичный способ производства термопластичных деталей и прототипов.	1.Низкая точность маленьких деталей; 2.Видимые линии - лестничный эффект; 3. Анизотропные свойства напечатанных деталей.
<b>Material Jetting</b>	Струйное нанесение и отверждение жидкого полимера под воздействием ультрафиолетового излучения	1.Специальный жидкий фотополимер; 2.Легкоплавкие материалы, воск; 3.Специальные чернила с наночастицами металла.	1.Высокое разрешение; 2.Гладкая поверхность; 3.Однородные механические и термические свойства изделия.	1.Высокая стоимость материалов и принтеров; 2.Необходимость в поддерживающих структурах; 3.Слабые механические свойства.

Методы	Особенность метода	Материал	Достоинства	Недостатки
<b>Powder Bed Fusion</b>	Частицы металлического порошка плавятся с использованием источника тепла, такого как лазер или электронный луч, для формирования слоя	Металлический порошок.	1.Создание прочных объектов; 2.Низкий расход материала; 3.Возможность создавать сложные формы и конструкции.	1.Относительно длительное время печати; 2.Ограничения по размеру изделий; 3.Текстура поверхности; 4.Высокие энергозатраты.
<b>Sheet Lamination</b>	Изделие формируется склейкой (сваркой, спеканием) тонких листов	1.Металлический слоистый материал; 2.Металлическая фольга.	1.Доступность исходных материалов и оборудования для их раскроя; 2.Возможность добавлять компоненты во время процесса; 3.Отсутствие необходимости в опорных конструкциях	1.Отслоение плёнки; 2.Изделие плохо фальцуется; 3.Ограничения по плотности ламинируемой бумаги.
<b>Vat Photopolymerization</b>	Изделие строится снаружи слой за слоем в ванне, заполненной жидкой фотополимерной смолой	Жидкие или пастообразные фотополимерные смолы.	1.Высокая скорость отверждения; 2.Отсутствие легколетучих неактивных растворителей.	1.Дорогой процесс; 2.Ограниченный выбор материалов; 3.Низкие механические характеристики.

Среди аддитивных технологий метод экструзии материала Fused-Deposition Modeling (FDM-метод, FDM-печать), является самым распространенным, благодаря способности легко адаптироваться под конкретные задачи и максимально быстро запускать изделия сложной геометрии в производство при минимальных затратах [33-37].

В работе [38] рассмотрен процесс изготовления изделий ракетно-космической техники с использованием FDM-печати. Авторы исследования спроектировали, изготовили и провели успешные рабочие испытания заглушки сопла «мембранного» типа (рисунок 7).



Рисунок 7 – Заглушка сопла «мембранного» типа, изготовленная с помощью FDM-печати [46]

В работе [39] продемонстрировано рабочее колесо вентилятора с повышенной эффективностью за счет оптимизации геометрии, использовании высокоэффективных материалов и FDM-печати. На рисунке 8 представлено напечатанное рабочее колесо вентилятора.

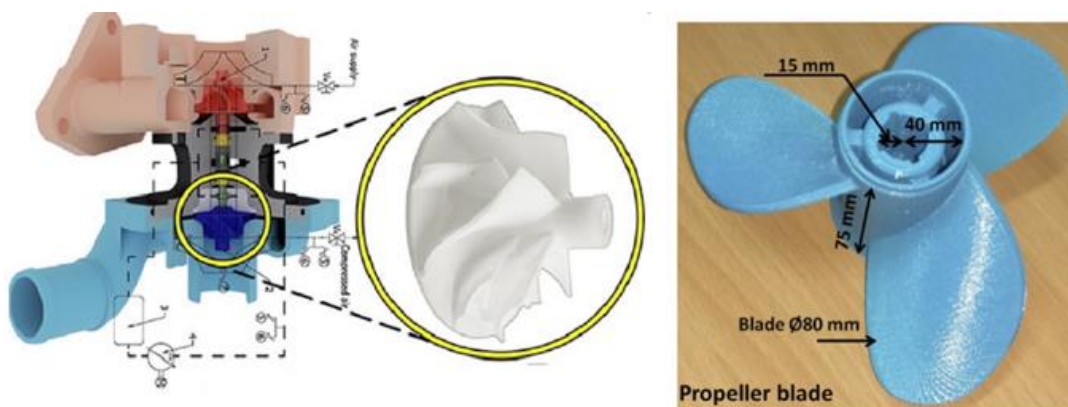


Рисунок 8 – Рабочее колесо вентилятора, полученное методом FDM-печати [39]

Сравнивая технологии 3D-печати, можно сделать вывод, что технология FDM является наиболее оптимальной по соотношению возможностей и доступности. Её преимуществами являются гибкость в работе с широким спектром материалов, а также экономичная цена на оборудование, соответственно, промышленное внедрение разработок и материалов для данной технологии будет проходить значительно проще, что повышает значимость данной работы.



### 1.3.2 Материалы для FDM-печати

Основными материалами, используемыми для FDM-печати, являются термопластичные полимеры. В последнее время стало возможным изготовление данным методом изделий из композиционных материалов, армированных непрерывными волокнами, благодаря использованию специальных принтеров с двумя соплами: одного с матричным полимером, другого с непрерывным волокном [40,41].

В зависимости от конструкции и условий эксплуатации готового изделия для его производства выбирает либо чистый термомласт, либо композит на его основе. К наиболее распространенным материалам, используемым в качестве термопластичных матриц, можно отнести такие полимеры, как акрилбутадиенстирол (АБС), полиамиды (ПА6 или ПА66), полипропилен (ПП), политетрафторэтилен (ПТФЭ) или их сочетание с другими добавками. В последнее время область применения FDM-печати существенно расширилась за счет суперконструкционных термопластов, таких как полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), полиэфиркетонкетон (ПЭКК), полиэфиримид (ПЭИ) [42].

Основные полимеры для аддитивных технологий представлены на рисунке 9, а их характеристики представлены в таблице 3.

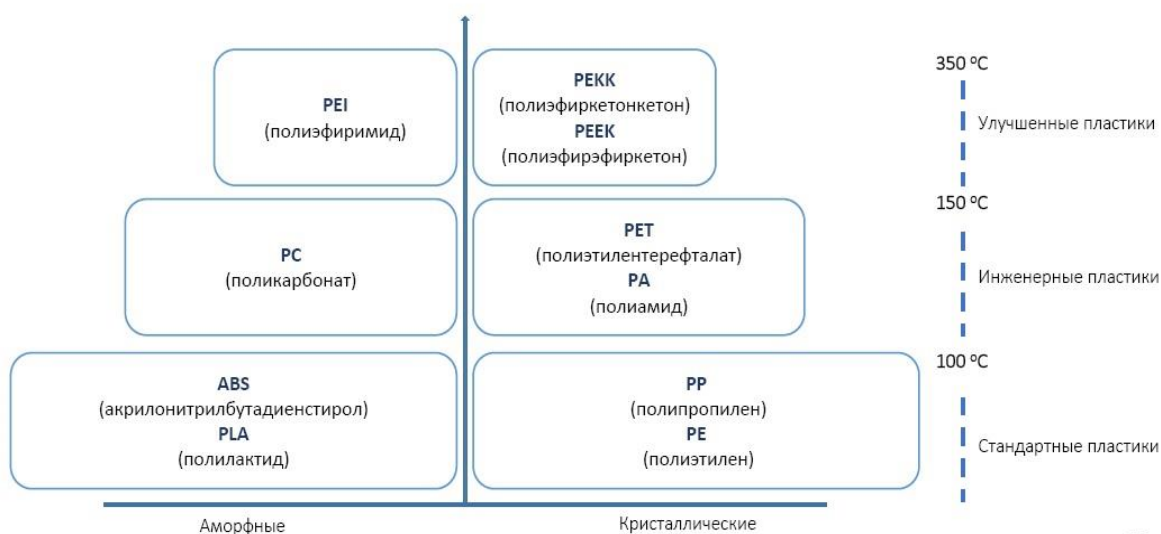


Рисунок 9 – Полимеры для FDM-печати, применяемые в промышленности

Таблица 3 – Основные эксплуатационные характеристики ненаполненных, гранулированных полимеров

Наименование показателей	ПЭЭК	ПФСУ	ПФС	АБС	ПА
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,30	1,27	1,35	1,19	1,13 – 1,14
Прочность при разрыве, МПа	100	58-60	75	50	65
Модуль упругости при растяжении, МПа	3600	2500	3700	2000	2300
Температура эксплуатации, °С	-60 / +250	-50/+190	-60/+220	-40/+90	-60/+120
Водопоглощение, %	0,20	0,35	1,8-3	0,2-0,4	6-7
Ориентировочная цена, р за кг	70000	50000	20000	2000	6000

При использовании аддитивных технологий решающее влияние на механические свойства и технологичность оказывает выбор материала [43-45]. Выбор материала матрицы зависит от требований, предъявляемых к готовому изделию (механическая прочность, электро- и теплопроводность, химическая стойкость, термостойкость, жесткость и т.д.), а также стоимость. Кроме этого, необходимо учитывать так же стоимость, как самого материала, так и готового изделия, поскольку стоимость суперконструкционных полимеров типа ПЭЭК, ПЭКК может на несколько порядков отличаться от стоимости базовых. Например, розничная цена АБС-пластика – примерно 200 рублей за кг, а стоимость полиэфирэфиркетона – около 50 тыс. рублей за кг.

#### **1.4 Особенности конструкторско-технологического обеспечения FDM-печати изделий сложной формы**

FDM-печать позволяет получать изделия сложной геометрической формы и обеспечивает возможность изготовления изделий меньшей массы при выполнении технических требований за счет оптимального внутреннего заполнения, что позволяет экономить материал, и, за счет этого снижает временные и материальные затраты на производство [46].

FDM-печать включает в себя достаточно широкий спектр возможностей проектирования и даже позволяет определять конкретные критерии или стратегии проектирования для аддитивного производства [47-50].

При уменьшении массы изделия цель состоит в минимизации количества используемого материала без ущерба для механической прочности. Это означает максимизацию эффективности использования материала и имеет ряд преимуществ, как экономических, так и экологических [51,52]. Однако за счет уменьшения массы конструкций геометрическая сложность деталей может увеличиться, что значительно затрудняет или даже делает невозможным их производство с использованием традиционных технологий. Технология FDM-печати позволяет решить эту проблему за счет специфики послойного нанесения материала с использованием компьютерной модели изделия. Кроме того, современное оборудование позволяет использовать несколько видов материала для печати одного изделия без сложной переналадки [53, 54].

Для уменьшения массы изделия, изготавливаемого методом FDM-печати, можно использовать множество стратегий, поскольку они предоставляют возможность проектировать сложную геометрию без ограничений, присущих традиционным технологиям [55]. На рисунке 10 представлена классификация стратегий уменьшения массы изделий, изготавливаемых методами аддитивного производства.

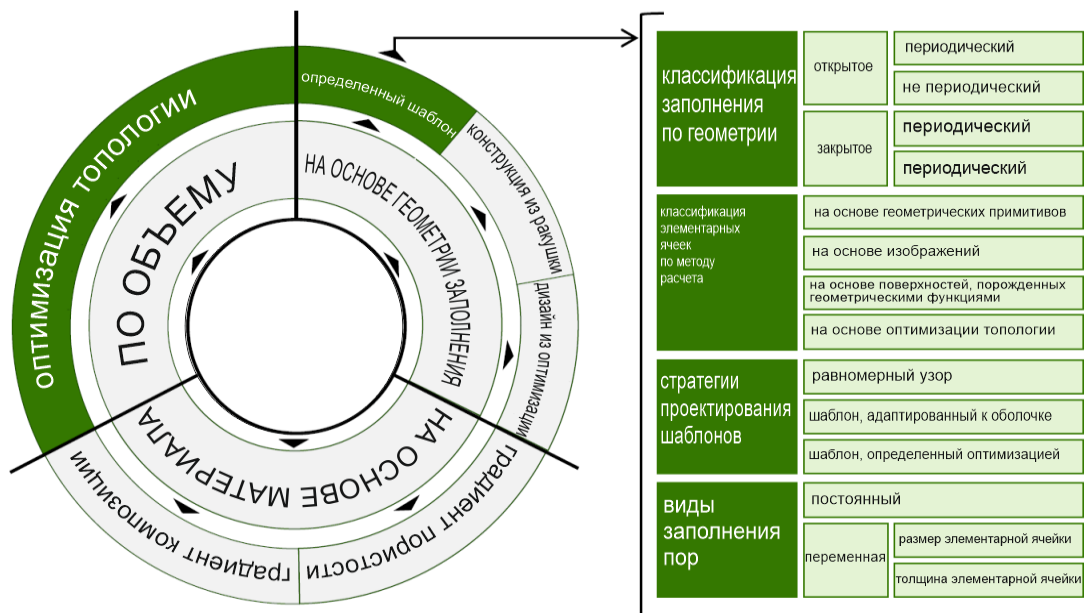


Рисунок 10 – Классификация стратегий по уменьшению массы изделий, изготавливаемых методами FDM-печати [56]

В работе [57] авторы проанализировали и показали оптимизированные конструкции изделий с неполным заполнением внутреннего объема, обеспечивающие требуемые характеристики (рисунок 11).

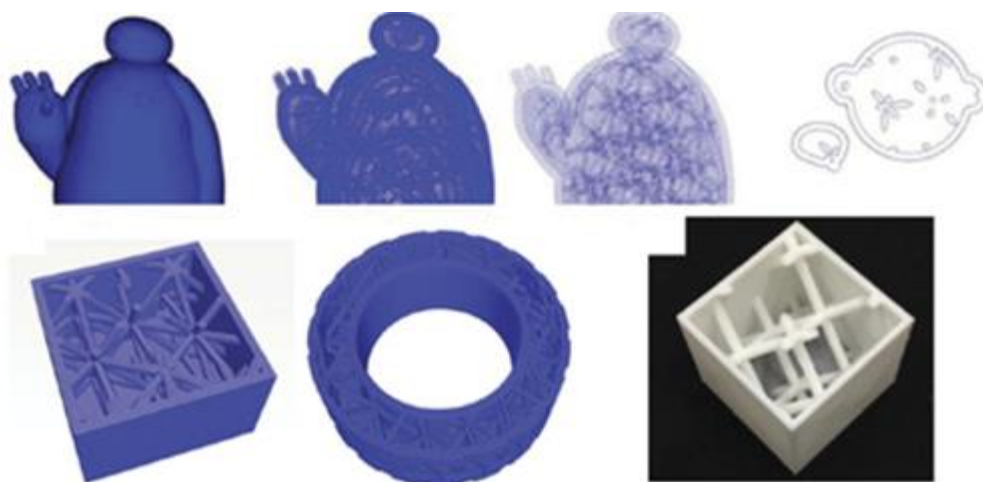


Рисунок 11 – Проектирование конструкций, получаемых с помощью FDM-печати, с различными вариантами заполнением внутреннего объема [57]

Авторы работы [57] провели также исследования оптимизации конструкции с учетом внешней нагрузки с целью проектирования пористых структур для заполнения внутреннего объема. На рисунке 12 представлена конструкция заполнения с учетом направлений главных напряжений и модель кости.

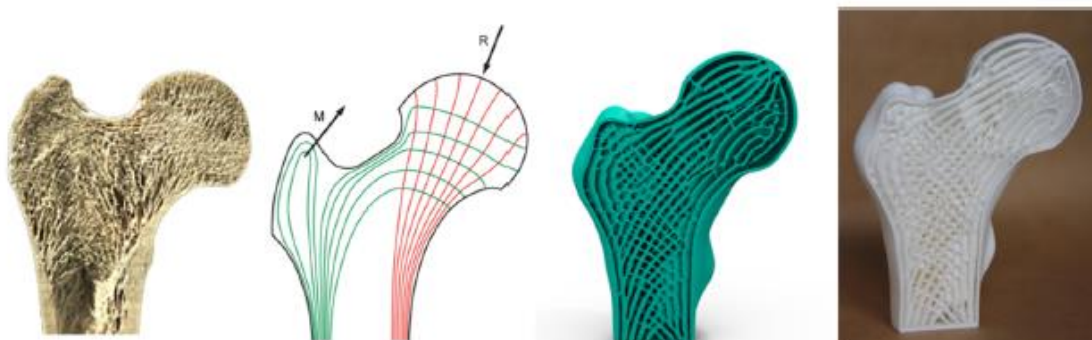


Рисунок 12 – Конструкция заполнения с учетом направлений главных напряжений и 3D-печатная модель кости [57]

Анализ работ [46-57] позволяет сделать вывод о том, что при изготовлении изделий сложной формы методом FDM-печати с уменьшенной массой достаточно

подобрать оптимальную степень заполнения для соблюдения технических требований. Однако с уменьшением степени заполнения изменяются эффективные характеристики материала, под которыми в данном случае понимается модуль упругости, коэффициент Пуассона, модуль сдвига и т.д. Согласно литературе [58-62] главной проблемой при изготовлении изделий с разной степенью заполнения является отсутствие зависимостей фактических значений характеристик готового продукта при достаточно малых степенях заполнения. На текущий момент существуют модели, позволяющие определить фактические значения характеристик, но они направлены только на большую степень заполнения.

Аддитивные технологии и традиционные методы обработки имеют свои уникальные характеристики и области применения. Традиционное производство остается предпочтительным выбором для массового выпуска стандартных продуктов, требующих высокой производительности предприятия. Аддитивное производство становится все более популярным в сферах, где важны индивидуальные решения, сложные геометрические формы и быстрые изменения в производственном процессе.

Основные преимущества аддитивного производства перед традиционными методами изготовления изделий сложной формы представлены на рисунке 13.



Рисунок 13 – Преимущества аддитивного производства перед методами традиционного производства изделий сложной формы [56]

На рисунке 14 представлена зависимость себестоимости от числа изготовленных деталей для традиционных и аддитивных технологий изготовления [63].

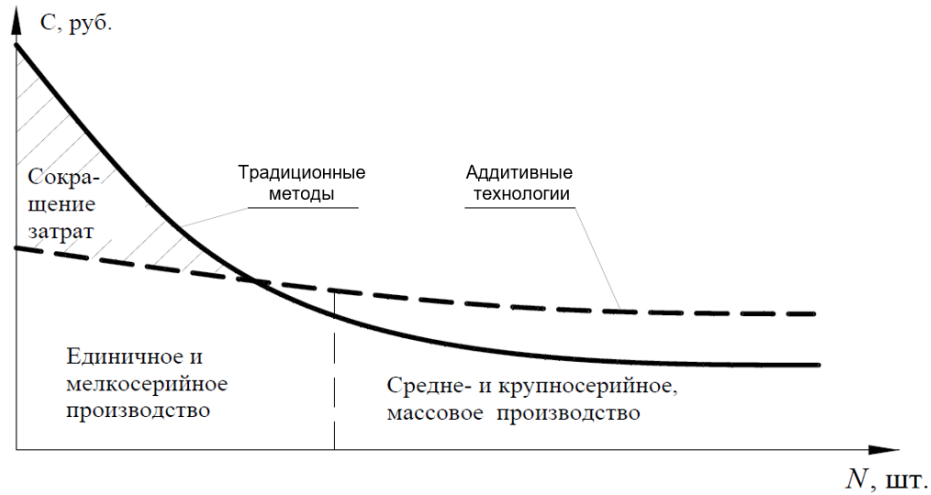


Рисунок 14 – Зависимость себестоимости от числа изготовленных деталей для традиционных и аддитивных технологий изготовления (С – себестоимость, руб.; N – число деталей, шт.) [63]

На рисунке 15 представлены преимущества аддитивных технологий по затратам при проектировании и производстве изделий сложной формы.



Рисунок 15 – Преимущества аддитивных технологий по затратам при проектировании и производстве изделий сложной формы

Таким образом, с точки зрения проектирования, затрат на материалы, легкости внесения изменений в геометрию изделия и отсутствия необходимости в проектировании и изготовлении специализированной оснастки аддитивные технологии обладают неоспоримыми преимуществами перед традиционными методами. Особенно этот вопрос актуален для мелкосерийного и единичного производства [64-66].

### **1.5 Анализ современных исследований о влиянии параметров процесса FDM-печати на физико-механические характеристики готового изделия**

Как в любом технологическом процессе, в процессе FDM-печати существуют различные режимы, оказывающие большое влияние на время печати, качество и физико-механические свойства напечатанных изделий. Выбор правильного сочетания технологических параметров позволяет прогнозировать характеристики будущего изделия и управлять ими.

Все технологические режимы процесса FDM-печати можно условно разделить на три группы (рисунок 16):

- режимы оборудования (диаметр сопла экструдера);
- режимы обработки, обусловленные реологическими свойствами материала (температура камеры, температура экструзии, температура стола);
- структурные режимы печати (ориентация печати, толщина растра, ширина растра, заполнение, межрастровый зазор и т.д.).

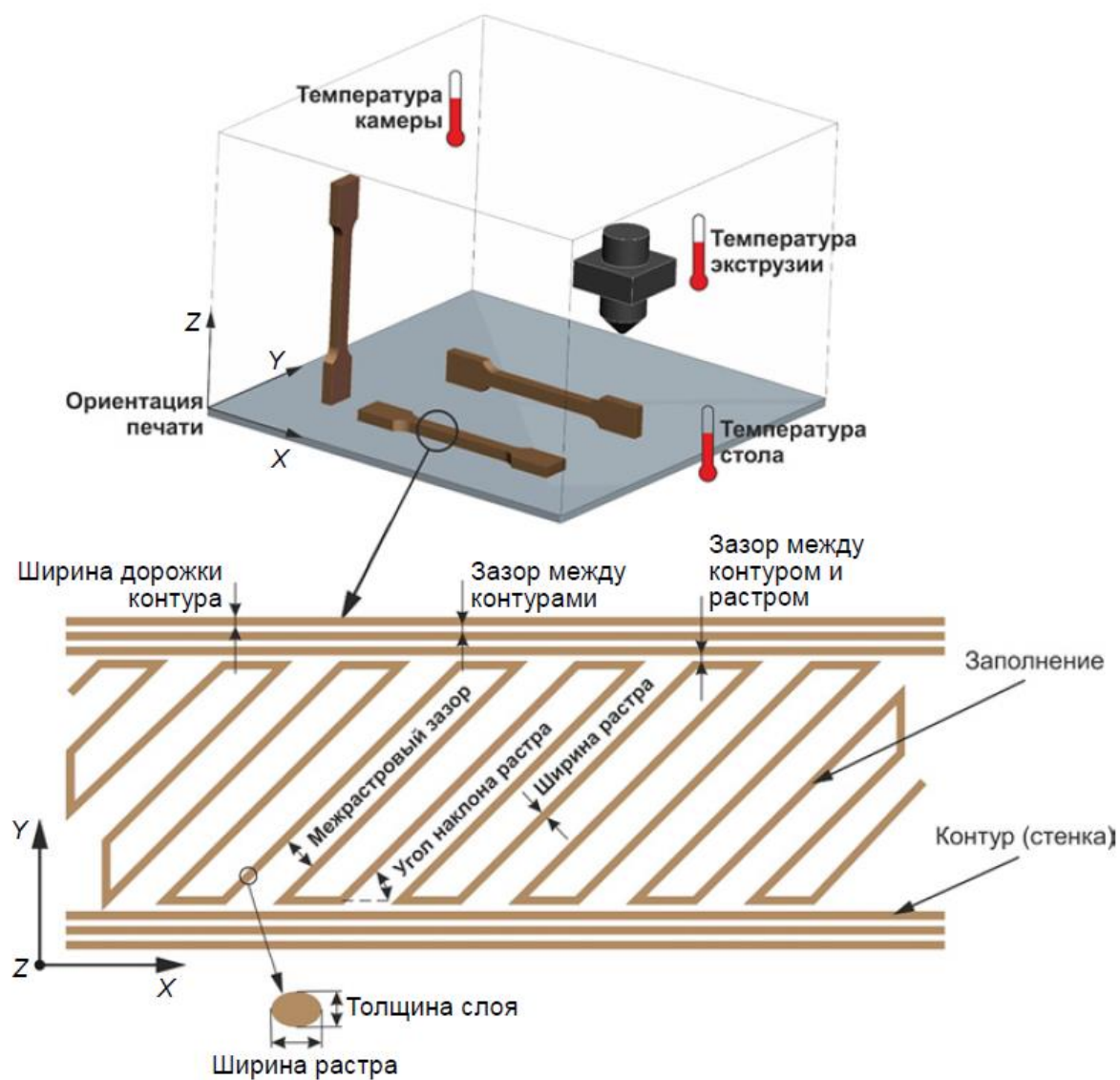


Рисунок 16 – Режимы процесса FDM-печати

Взаимосвязь между входными и выходными параметрами печати сложна и нелинейна [67]. Очевидно, что не все режимы процесса оказывают одинаковое влияние на конечный результат; некоторые режимы процесса оказывают большее влияние, другие — меньшее. Оценка взаимосвязи параметров печати и свойств изделий обычно проводится с использованием образцов, форма и размеры которых регламентируются соответствующими стандартами. На основе испытаний образцов из чистых термопластов [68-70] и композитов с термопластичной матрицей [71,72] на растяжение, изгиб, сжатие и усталость определяются такие механические свойства, как прочность при растяжении, предел текучести, прочность при сжатии, усталостная прочность, относительное удлинение, вязкость,



пористость и т.д. [73,74]. Большинство исследований сосредоточено на определенном круге параметров, которые проиллюстрированы с помощью диаграммы Исикавы, изображенной на рисунке 17.

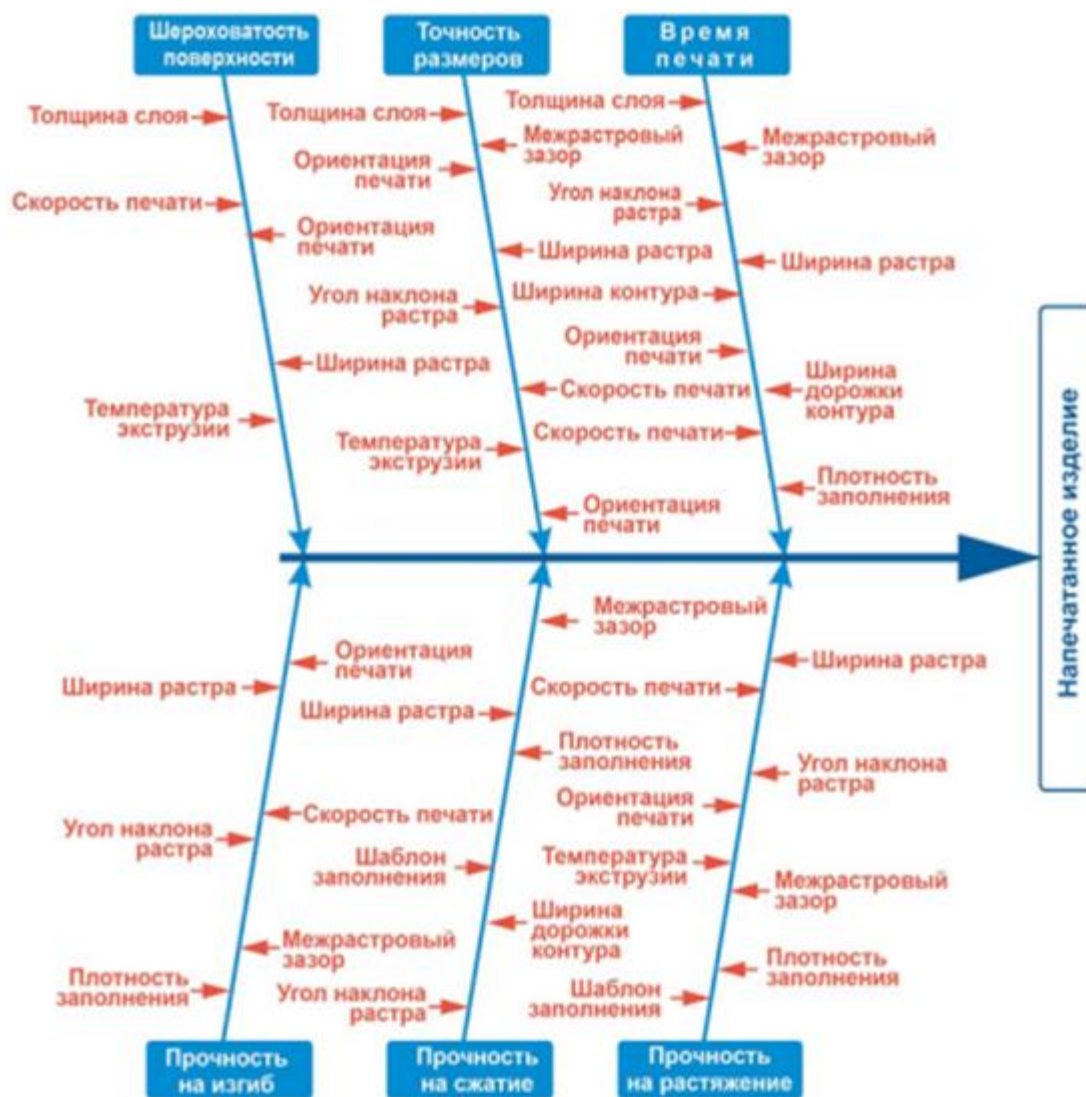


Рисунок 17 – Диаграмма Исикавы, иллюстрирующая влияние параметров процесса FDM-печати на характеристики изделия [73]

В таблице 4 приведено краткое описание исследований влияния параметров печати на механические свойства образцов из различных материалов. В таблице приведены наиболее часто используемые при FDM-печати материалы (в том числе, выпускаемые промышленно), однако, следует отметить, что линейка материалов, используемых в этой технологии гораздо более широкая.

Таблица 4 – Систематизация исследований зависимости физико-механических свойств образцов от параметров процесса FDM-печати

Материал	Режимы процесса	Значения параметров	Свойства образцов	Источник
АБС	Межрастровый зазор (мм) Ширина растра (мм) Температура экструзии (°C) Ориентация печати (°)	0, -0.0508, 0.508, 1, 270, 280, 0, 90	Прочность на растяжение Прочность на сжатие	[75]
АБС	Высота слоя (мм) Угол наклона растра (°) Плотность заполнения (%)	0.35, 0.4, 0.5 45, 55, 65 40, 60, 80	Прочность на растяжение Предел текучести Относительное удлинение	[76]
АБС	Межрастровый зазор (мм) Ширина растра (мм) Ориентация печати (°)	0, 1.27 0.305, 0.98 0, 90	Предел текучести Прочность на сжатие Пористость	[77]
АБС	Ориентация печати (°) Межрастровый зазор (мм) Угол наклона растра (°) Ширина растра (мм)	0, 90 -0.0025, 0.5588 0, 45 0.2034, 0.5588	Прочность на растяжение	[78]
АБС	Высота слоя (мм) Ориентация печати (°) Межрастровый зазор (мм) Угол наклона растра (°) Ширина растра (мм)	0.1270, 0.1780, 0.2540 0, 15, 30 0, 0.0040, 0.0080 0, 30, 60 0.4064, 0.4564, 0.5064	Прочность на растяжение Ударная вязкость Прочность на изгиб	[79]
АБС	Скорость печати (мм/с) Высота слоя (мм) Плотность заполнения (%) Диаметр сопла (мм) Схема заполнения	25, 30, 35 0.1, 0.2, 0.3 25, 50, 75 0.3, 0.4, 0.5 Линейная, сотовидная	Фрактография Усталостные свойства	[80]
АБС	Угол наклона растра (°) Ширина растра (мм)	0, 30, 60 0.404, 0.479, 0.554	Прочность на сжатие	[81]
ПЛА	Ориентация печати (°)	0, 45, 90	Прочность на растяжение Усталостные свойства Энергия деформации	[82]
ПЛА	Температура экструзии (°C) Плотность заполнения (%) Высота слоя (мм)	190, 200, 210, 220, 230 10, 20, 30, 40, 50 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3	Прочность на растяжение Плотность Время печати Относительное удлинение	[83]
ПЛА	Температура экструзии (°C) Плотность заполнения (%) Скорость печати (мм/с)	190, 210 20, 100 50, 150	Прочность на растяжение	[84]
ПЛА	Температура экструзии (°C)	210, 220, 230, 240, 250	Прочность на растяжение Модуль упругости	[85]
ПЛА	Схема заполнения	Сетчатая Треугольная Четверть кубическая Гексагональная	Ударная вязкость Прочность на сжатие	[86]
ПЛА	Температура экструзии (°C) Скорость печати (мм/с) Диаметр сопла (мм) Высота слоя (мм)	200, 215, 230 20, 30, 40 0.2, 0.4, 0.6 0.1, 0.2, 0.3	Время печати Прочность на растяжение Шероховатость поверхности	[87]
ПЭЭК	Диаметр сопла (мм) Температура экструзии (°C) Высота слоя (мм)	0.4, 0.6, 0.8 360, 380, 400, 420, 440, 460 0.25, 0.3, 0.35, 0.4	Прочность на растяжение Шероховатость поверхности Плотность	[88]

Материал	Режимы процесса	Значения параметров	Свойства образцов	Источник
ПЛА	Угол наклона растра (°) Высота слоя (мм) Ширина растра (мм)	0, 30, 45, 60, 90 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 0.4, 0.5, 0.6, 0.7	Прочность на растяжение	[89]
АБС	Угол наклона растра (°)	0, 45, 90, 45/-45	Прочность на растяжение Прочность на сжатие Прочность на изгиб Усталостная прочность	[90]
ПЭЭК	Высота слоя (мм) Угол наклона растра (°)	0.2, 0.3, 0.4 0, 30, 45	Прочность на растяжение Прочность на изгиб Прочность на сжатие	[91]
ПЭЭК	Температура экструзии (°C) Ориентация печати (°)	360, 370, 380, 390, 400, 410, 420 0, 90	Плотность Прочность на изгиб Прочность на растяжение Относительное удлинение	[92]
ПЭЭК	Температура экструзии (°C) Скорость печати (мм/с)	380, 390, 400, 410, 420 20, 30, 40	Прочность на растяжение Относительное удлинение	[93]
ПЭИ	Температура экструзии (°C) Ориентация печати (°)	360, 370, 380, 390, 400, 410, 420 0, 90	Плотность Прочность на изгиб Прочность на растяжение Относительное удлинение	[94]
ПЕТГ	Плотность заполнения (%)	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	Прочность на растяжение Шероховатость поверхности	[95]

Таким образом, хотя FDM-технологии и позволяют регулировать большое количество параметров, для печати стабильного изделия с заданными свойствами эти режимы необходимо оптимизировать, а любое, даже незначительное, их изменение может привести к значительным, не всегда положительным, изменениям механической прочности и качества готового изделия. Поэтому для реальных изделий при выборе параметров печати чаще всего используют рекомендации поставщиков материала, настройки, заложенные в программном обеспечении 3D-принтера для конкретного материала, или печать тестовых образцов.

### 1.5.1 Диаметр сопла и высота слоя

Влияние диаметра сопла и высоты слоя на механические свойства, качество поверхности, время печати и расход материала является весьма значительным, поэтому эти два параметра, как правило, рассматриваются вместе. В работе [87] исследовано влияние диаметра сопла на механические свойства, шероховатость

поверхности и время печати. Выявлено, что при изменении диаметра сопла с 0.2 до 0.6 мм прочность на разрыв увеличилась на 19%, а время изготовления уменьшилось с 3.81 до 1.30 ч, но, с другой стороны, качество поверхности снизилось на 8%.

В работе [79] были проведены исследования зависимости предела прочности на растяжение от угла растра, высоты слоя и ширины растра (диаметра сопла) для образцов из ПЛА. Более высокая прочность на растяжение отмечается при меньшей толщине слоя из-за большей площади сцепления между поверхностями раздела слоев. Для большинства образцов максимальная прочность на растяжение наблюдалась при ширине растра 0.6 мм. Авторы объясняют это тем, что при большей ширине растр обладает большей тепловой энергией, медленнее охлаждается, что обеспечивает лучшее сцепление слоев между собой. Кроме этого, большая ширина растра обеспечивает большую площадь контакта между слоями, что так же повышает прочность сцепления. Однако при дальнейшем увеличении ширины растра наблюдалось появление пустот между слоями. Наличие таких пустот может быть причиной возникновения и распространения трещин в образце, и, следовательно, более низкой прочности на растяжение.

### **1.5.2 Ориентация и угол наклона растра**

Угол наклона растра играет большую роль в механических свойствах и анизотропии изделий, напечатанных на FDM-принтере. Результаты большинства исследований для различных материалов показывают одинаковую тенденцию влияния угла растра на прочность, которая получается наибольшей и наименьшей при углах 0 и 90° соответственно, а для средних углов растра (0°-90°) по мере увеличения угла прочность постепенно уменьшается.

Более высокая прочность обычно достигается при направлении растра, совпадающем с направлением приложения силы при испытаниях на разрыв, а межслойное чередование углов позволяет изменять прочность, относительное

удлинение и ударную вязкость в более широких пределах, чем печать с одним значением угла раstra [90].

В других работах [91, 92] показано, что при выборе угла наклона раstra, совпадающего с максимальным размером образца по длине, была достигнута самая высокая прочность на растяжение. Кроме того, также исследовалась прочность при изгибе, и было обнаружено, что при углах наклона  $0^\circ$ ,  $+45^\circ/-45^\circ$  и  $90^\circ$  значение предела прочности было самым высоким. Основываясь на литературных данных [93-95], можно утверждать, что угол наклона раstra играет важную роль в формировании анизотропии свойств.

Наряду с различными вариантами угла наклона раstra (однонаправленный и изменяющейся) существенное влияние на механические свойства оказывает ориентация печати. Так, в работе [79] исследовано влияние ориентации печати на прочность при растяжении и усталостные свойства. Исследования проведены для образцов из ПЛА для трех вариантов ориентации печати ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  относительно оси X принтера). Как и ожидалось, предел прочности при растяжении был максимальным при направлении печати  $0^\circ$ , но усталостная прочность была максимальной при направлении печати  $45^\circ$  при всех уровнях циклической нагрузки.

Таким образом, угол наклона раstra и ориентация печати являются одними из наиболее важных параметров, связанных с прочностью изделий при FDM-печати.

### **1.5.3 Степень заполнения**

Степень заполнения оказывает большое влияние на механические свойства, поскольку с ее увеличением уменьшается количество пустот и за счет этого увеличивается плотность изделия и, как следствие, прочность. Шероховатость поверхности при этом уменьшается. В работе [89] было проведено исследование влияния степени заполнения на прочность при растяжении и шероховатость поверхности для образцов из ПЭТГ. Результаты показали, что увеличение степени

заполнения увеличивает прочность и улучшает шероховатость поверхности, но, в свою очередь, увеличивает время и стоимость печати.

#### 1.5.4 Температура экструзии

Другим важным параметром является температура экструзии, которая во многом определяет механические свойства, влияя на время затвердевания отдельных слоев и скорость печати. Кроме того, повышение температуры сопла приводит к лучшей текучести расплава и увеличивает относительную плотность за счет уменьшения воздушных пор. Относительная плотность обычно используется в качестве основного критерия для оценки качества печати и пригодности полимеров для FDM-печати. В работе [87] показано, что при повышении температуры экструзии для ПЭЭК и ПЭИ относительная плотность и прочность на изгиб постепенно увеличиваются. В работе [82] обнаружено, что при повышении температуры экструзии с 210 до 250 °С для образцов из ПЛА прочность на растяжение и модуль упругости увеличиваются, поскольку усиливается сцепление между слоями и отдельными растрами.

Анализ литературных данных о влиянии параметров процесса FDM-печати на механические характеристики образцов из различных материалов позволяет сделать следующие выводы:

1. АБС и ПЛА являются двумя самыми распространенными материалами из группы термопластов, для которых проведены исследования.
2. Из всех параметров процесса FDM-печати угол наклона растра, температура и скорость печати, а также высота слоя являются ключевыми, оказывающими наибольшее влияние на механические свойства и анизотропию образцов.
3. Высота слоя и степень заполнения позволяют улучшать механические свойства за счет уменьшения пустот в полученных образцах.

Исходя из этого, представляется целесообразным провести исследования влияния угла наклона раstra, температуры печати, скорости печати и высоты слоя на механические характеристики образцов, полученных методом FDM-печати.

## 1.6 Анализ современных исследований о влиянии дополнительной обработки изделий, получаемых FDM-печатью

Методы дополнительной обработки можно разделить на методы предпечатной подготовки (предобработка), дополнительную обработку непосредственно в процессе печати и методы, применяемые по окончании печати изделия (постобработка) [96, 97]. На рисунке 18 представлена схема, иллюстрирующая методы дополнительной обработки изделий, получаемых FDM-печатью.

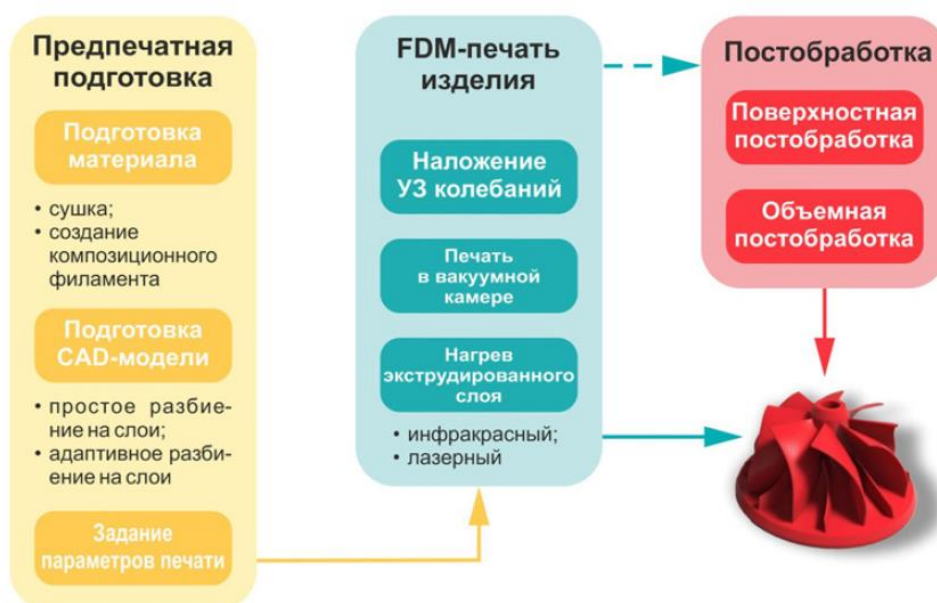


Рисунок 18 – Методы дополнительной обработки изделий, получаемых FDM-печатью

В многочисленных исследованиях отмечается, что изделиям из термопластичных полимеров и композитов, напечатанным методом FDM, присущи

недостатки, которые непосредственно влияют на механические характеристики и внешний вид готового изделия.

К основным недостаткам изделий, напечатанных методом FDM, относятся [98]:

- искажения формы, возникающие из-за остаточных напряжений, вызванных температурными градиентами во время печати;
- микропустоты, возникающие в чистом полимере в зависимости от межрастрового зазора и высоты слоя, задаваемых при печати;
- микропустоты, возникающие при печати композиционного материала вследствие неравномерного распределения наполнителя внутри материала матрицы либо плохого сцепления между наполнителем и матрицей;
- высокая шероховатость поверхности готового изделия, возникающая из-за лестничного эффекта.

Большинство недостатков могут быть минимизированы путем подбора оптимальных параметров процесса печати. Однако, вследствие нелинейных зависимостей между параметрами процесса FDM-печати и свойствами готового изделия нередко только варьирование параметрами процесса не дает желаемого эффекта. Поэтому в настоящее время проводятся исследования применимости различных методов дополнительной обработки изделий, направленных на минимизацию дефектов, возникающих при FDM-печати. Согласно классификации, приведенной на рисунке 18, методы постобработки разделяются на поверхностную обработку и объемную.

### **1.7 Поверхностная постобработка**

В настоящее время для минимизации лестничного эффекта и улучшения качества поверхности готового изделия используются следующие группы методов поверхностной постобработки (рисунок 19):



— механические методы, основанные на снятии слоя материала с поверхности готового изделия (шлифование, полирование, пескоструйная, гидроабразивная обработка);

— химические методы, основанные на частичном растворении поверхности готового изделия в химически активной среде. При этом изделие может либо погружаться в растворитель целиком, либо обрабатываться его парами;

— термические методы, основанные на повторном частичном плавлении (повторном подплавлении) поверхности готового изделия с помощью какого-либо источника нагрева. В качестве такого источника чаще всего используется лазер (лазерное шлифование, полирование и т.д.) или тепловая пушка;

— нанесение покрытий на поверхность готового изделия с целью выравнивания поверхности изделия за счет заполнения пор и сглаживания выступов.



Рисунок 19 – Методы поверхностной постобработки

Для реализации большинства механических методов, а также для нанесения покрытий PVD-, CVD- и электрохимическими методами требуется наличие специального промышленного оборудования (обрабатывающих станков, вакуумных установок и т.п.), а механическое покрытие поверхности готового изделия, как правило, не вносит каких-либо изменений в физико-механические свойства, улучшая только внешний вид. Поэтому большая часть современных исследований сосредоточена на химическом и термическом (обработке лазером) методах поверхностной постобработки. Остановимся на некоторых аспектах данных методов.

### **1.7.1 Химическая обработка**

При химической постобработке поверхности напечатанное изделие погружается в растворитель целиком или обрабатывается горячими или холодными парами растворителя. В качестве растворителей используются такие вещества, как ацетон, этилацетат, тетрагидрофуран, хлороформ, дихлорметан и др. [99-102]. Внешняя поверхность изделия растворяется, шероховатость поверхности сглаживается, промежутки между слоями заполняются растворенным полимером. При затвердевании поверхность становится более гладкой. Однако ряд исследований показывает, что такая обработка может отрицательно влиять на механические свойства изделий из АБС [103,104].

### **1.7.2 Термическая постобработка**

Для уменьшения шероховатости поверхности напечатанных изделий используется термическая обработка лазером, при которой поверхность изделия быстро нагревается и плавится. Благодаря этому процессу происходит сглаживание поверхностных неровностей, а расплавленный полимер заполняет пустоты в поверхностных слоях, что способствует улучшению физико-механических свойств [105]. Однако в ряде исследований отмечается, что лазерная обработка имеет

большой эффект на изделиях из полукристаллических термопластов (например, ПЛА), в то время как на изделиях, напечатанных из аморфных термопластов (АБС и других), шероховатость поверхности практически не изменяется [106].

В работе [107] рассматривается применение тепловой пушки в качестве источника поверхностного нагрева для уменьшения пористости элемента вакуумной системы, полученного FDM-печатью. Отмечено, что поверхностная термообработка с помощью пушки при температуре 400°C в сочетании с печатью с заполнением 98% обеспечивает снижение пористости, не вызывая значительных деформаций, что особенно актуально для реального изделия.

Кроме рассмотренных выше в настоящее время используются различные комбинации методов поверхностной постобработки, например, сочетание обработки в парах ацетона с отжигом, электрохимическое полирование, лазерная абляция с направленной (селективной) переплавкой и т.д. Большинство данных методов направлены на улучшение качества поверхности готового изделия за счет сглаживания лестничного эффекта. Наблюдающееся в ряде исследований незначительное улучшение физико-механических свойств после такой обработки объясняется, скорее всего, тем, что расплавленный полимер заполняет пустоты в поверхностных слоях, снижая пористость и улучшая межслойную адгезию.

## **1.8 Объемная постобработка**

К методам, позволяющим улучшать физико-механические характеристики напечатанного изделия, относятся методы объемной постобработки, основанные на воздействии на изделие в целом, а не только на его поверхность.

Как известно, при печати между слоями полимера при воздействии температуры и давления происходит, нагрев поверхности раздела, обеспечивающий локализованное течение полимера и молекулярную подвижность (поверхностный контакт), возникновение тесного физического контакта между двумя поверхностями раздела (так называемый рост шейки), за которым следует

молекулярная диффузия полимерных цепей по всей площади контакта (так называемое заживление) (рисунок 20) [108,109].

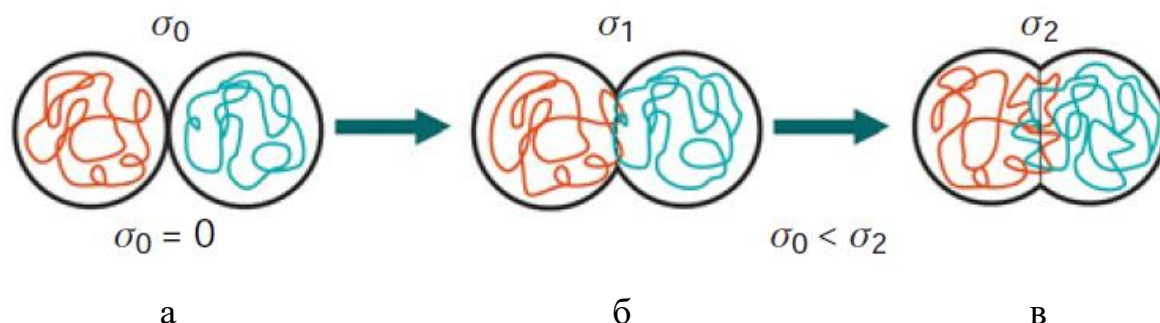


Рисунок 20 – Схема образования межслойной связи посредством поверхностного контакта (а); роста шейки (б) и молекулярной диффузии и повторного сцепления (в) [108,109]

Процессы роста шейки и заживления связаны между собой, поскольку молекулярная диффузия полимеров может происходить только в тех областях, где поверхности находятся в тесном контакте. Развитие такого контакта зависит от приложенного давления, температуры и времени взаимодействия, заживление, в основном, зависит от процесса нагрева-охлаждения и времени. Таким образом, прочность межслойного соединения и, как следствие, физико-механические свойства изделия зависят от температуры, давления и времени обработки:

$$\sigma = f(T, p, t) \quad (1)$$

Объемная постобработка позволяет проводить процесс в условиях поддержания стабильной температуры в течение всего времени обработки, увеличить время межслойного взаимодействия (от нескольких часов до нескольких суток), а также оказывать дополнительное давление на изделие. Это позволяет сделать процесс диффузии через межслойную границу более эффективным и приводит к улучшению физико-механических свойств.



Рисунок 21 – Методы объемной постобработки

С точки зрения факторов, влияющих на формирование межслойных связей, все методы объемной постобработки, применяемые в настоящее время для изделий, полученных FDM-печатью, можно разделить на две большие группы (рисунок 21):

- методы, основанные на термическом воздействии на изделие (факторы температуры и времени);
- методы, основанные на термическом и механическом воздействии на изделие (факторы температуры, давления и времени).

### 1.8.1 Отжиг без ограничения деформаций

Отжиг заключается в плавном повторном нагреве изделия до температуры стеклования материала или чуть выше, но ниже температуры плавления, выдержке при заданной температуре в течение определенного времени, а затем естественном охлаждении до температуры окружающей среды. Суть отжига без ограничения

деформаций заключается в том, что изделие свободно помещается в печь и никак не фиксируется. В таблице 5 представлена систематизация исследований технологий отжига без ограничения деформацией.

Таблица 5 – Систематизация исследований технологий отжига без ограничения деформаций

Материал	Режимы	Значения параметров	Свойства образцов	Источник
ПА+СВ ТПУ	Температура, °С Время, ч	120 0,5;2;4;8	Шероховатость Деформация Прочность на растяжение Реологические свойства	[110]
ПЭИ	Температура, °С Время, ч	230 24	Пористость Прочность на растяжение Реологические свойства	[111]
ТПУ	Угол наклона растра, ° Температура, °С Время, ч	0;90 60;80;100;120;140;160;180 10	Прочность на растяжение Реологические свойства Водопроницаемость	[112]
ПЛА ABS+ПК	Температура, °С Время, мин	90-210 30-240	Прочность на растяжение Прочность на изгиб Реологические свойства	[113]
ПП	Угол наклона растра, ° Температура, °С Время, ч	0;30;45;60;90 60;80;100;110;120;130;140; 150 1;2;8;12	Прочность на растяжение Реологические свойства	[114]
АБС АБС+УВ	Температура, °С Время, ч	105;125;175 0,5;2;4	Прочность на растяжение Прочность на изгиб Деформация	[115]
АБС ПЭТГ ПЭТГ+УВ	Высота слоя, мм Температура, °С Время, мин	0,1;0,2;0,3 60-100 30;60;90	Прочность на растяжение Деформации	[116]
ПЭТГ ПЭТГ+УВ ПЭТГ+КВ	Температура, °С Время, мин	90;110;130 30;240;480	Прочность на изгиб Реологические свойства испытаний на ползучесть	[117]
АБС	Заполнение, % Температура, °С Время, мин	20;50;100 105;115;125 20;25;30	Шероховатость Плотность	[118]
АБС ПЛА ПЛА+Cu АСА+Al	Температура, °С Время, ч	70;80;90 1	Прочность на растяжение Твердость Ультразвуковой контроль Деформация	[119]
АБС ПЛА	Ориентация печати Температура, °С Время, ч	XZ; XY; ZX 75;80 1	Прочность на растяжение Прочность на сжатие Деформация	[120]

Материал	Режимы	Значения параметров	Свойства образцов	Источник
АБС	Заполнение, % Температура, °С Время, мин	20;60;100 105;115;125 20;25;30	Шероховатость Твердость Деформация Прочность на растяжение Прочность на изгиб Ударная вязкость	[121]
ПЛА	Температура, °С Время, мин	65;75;85 45;60;75	Прочность на растяжение	[122]
ППС	Температура, °С Время, мин	100;130 45/360	Прочность на изгиб Реологические свойства	[123]
ПЛА	Заполнение, % Температура, °С	30;50;70;100 70;90;110	Прочность на сжатие	[124]
ПЛА	Температура, °С Время, мин	110 20;60	Прочность на растяжение Прочность на сжатие	[125]
ПЛА	Температура, °С Время, мин	65-90 10;180;600	Прочность на изгиб	[126]

Таким образом, анализ литературных источников показал, что термическая обработка, проводимая без фиксации размеров изделий, улучшая их физико-механические свойства, вызывает недопустимые деформации, что может сделать изделие непригодным для использования. Это происходит вследствие того, что в незафиксированном изделии отсутствуют силы, препятствующие его расширению при воздействии высоких температур, а при охлаждении неоднородное распределение температуры вызывает объемную усадку и образование остаточных напряжений. Причем для изделий из композиционных материалов наблюдаются меньшие значения деформаций по сравнению с чистыми полимерами в зависимости от процентного содержания наполнителя и вида постобработки. Однако в ряде исследований отмечается, что термическая обработка образцов из термопластов, улучшая механические свойства, вызывает недопустимые деформации, что в случае конкретного изделия может сделать его непригодным для использования [127-129]. В качестве способов решения проблемы изменения размеров в процессе термической постобработки образцов предлагаются различные технологические приемы – проведение отжига с ограничением деформации, в порошках различного состава и т.д [130, 131].

### 1.8.2 Отжиг с ограничением деформаций

В последнее время во многих исследованиях предлагаются различные технологические способы, направленные на ограничение деформаций изделий в процессе термической постобработки: отжиг в дисперсной среде, в жесткой форме или в эластичной оболочке. В таблице 6 представлена систематизация исследований технологий отжига с ограничением деформаций.

Таблица 6 – Систематизация исследований технологий отжига с ограничением деформаций

Вид постобработки	Материал	Режимы процесса	Значения параметров	Свойства образцов	Источник
Отжиг при низком давлении (вакуумный пакет)	ПЭИ	Ориентация печати Температура, °C Время, ч	XZ/XY/ZX 175-205 0,7-5,8	Шероховатость Прочность на изгиб	[132]
Отжиг в дисперсной среде	ПЛА ВПЛА	Заполнение, % Температура, °C Среда	40;100 100;1550;200 песок; CaSO <sub>4</sub>	Деформация	[133]
Отжиг при низком давлении	ПЭЭК+УВ	Температура, °C Время, мин Давление, кПа	150;180;210;240 30;60;180 35	Пористость Прочность на сдвиг Реологические свойства	[134]
Отжиг в форме	ПЭТГ	Ориентация печати Температура, °C Время, ч	XZ; XY; ZX 135;235 2	Прочность на растяжение	[135]
Отжиг в дисперсной среде	ПЛА	Угол наклона раstra, ° Температура, °C Время, мин Давление, кПа Среда	0;90 185 5 10 NaCl	Прочность на растяжение Плотность	[136]
Отжиг в дисперсной среде	ПЭТГ	Температура, °C Время, мин Давление, кг Среда	220 5;15 1,5 NaCl; CaSO <sub>4</sub>	Прочность на растяжение Прочность на сжатие	[137]
Отжиг в дисперсной среде	ПЛА	Угол наклона раstra, ° Высота слоя, мм Температура, °C Время, мин Форма	0;45;90 0,1;0,2 190;200 30;60 NaCl; CaSO <sub>4</sub>	Прочность на растяжение	[138]



Вид постобработки	Материал	Режимы процесса	Значения параметров	Свойства образцов	Источник
Отжиг в дисперсной среде	АБС	Угол наклона раstra, ° Температура, °С Время, мин Среда	0;90 135 120 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Деформация	[139]
Отжиг в дисперсной среде	АБС ПЛА	Температура, °С Время, мин Давление Среда	100;118;135;170;205;240 120 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Прочность на изгиб Деформация	[140]

### 1.8.3 Отжиг в дисперсной среде

Отжиг в дисперсной среде заключается в погружении изделия в дисперсную среду, находящуюся в закрытом объеме (контейнере). В качестве среды используются легко диспергируемые и не затрудняющие последующую очистку материалы — поваренная соль, гипс, тальк, песок, оксид алюминия. Дисперсная среда, находящаяся в закрытом контейнере, во-первых, позволяет фиксировать изделие по всем осям, а, во-вторых, играет роль теплоизолятора. Очевидно, что материал, используемый в качестве среды, оказывает дополнительное влияние на величину деформаций в процессе отжига [136-140].

### 1.8.4 Отжиг в жесткой форме

Отжиг в жесткой форме осуществляется в специальных формах, подобных формам для литья под давлением или прессования. Внутренние поверхности формы представляют собой негативный отпечаток формы изделия и позволяют фиксировать его по всем плоскостям во время отжига. Формы изготавливаются, как правило, из алюминия или его сплавов. Термическая обработка изделий из термопластов и композитов на их основе, проводимая в такой форме, позволяет увеличить прочность на растяжение и относительное удлинение изделий, причем ориентация печати не оказывает существенного влияния на механические характеристики [135]. Использование металлических форм дает возможность

использовать в качестве обработки не только отжиг, но и плавку (нагрев выше температуры плавления).

### **1.8.5 Отжиг в эластичной оболочке**

Отжиг в эластичной оболочке заключается в помещении изделия для фиксации его размеров в процессе постобработки в эластичную оболочку, в качестве которой, например, может выступать полиамидный пакет [132]. Для уменьшения зазора между оболочкой и изделием, а также для лучшей фиксации изделия перед его помещением в печь производится откачка воздуха с помощью насоса.

Таким образом, анализ литературных источников [96-140] показал, что из всех видов постобработки наибольшее влияние, как на качество поверхности, так и на физико-механические свойства готовых изделий, оказывает термическая обработка (отжиг). Это объясняется тем, что в процессе термообработки тепловое воздействие оказывается не только на поверхность, но и на весь объем образца. Вследствие этого, благодаря снижению вязкости, при температуре стеклования молекулярное поверхностное натяжение сводится к минимуму, материал растекается по поверхности и заполняет пористые участки, зазоры внутри слоев. Лестничный эффект на поверхности так же снижается. По своим физико-механическим свойствам напечатанные образцы после термообработки могут быть сравнимы с образцами, полученными литьем под давлением.

Однако на данный момент отсутствуют системные исследования влияния того или иного способа ограничения деформаций на свойства образцов и практически нет упоминания применения данных технологий к реальным изделиям, полученным FDM-печатью.

Таким образом, анализ методик и результатов исследований о влиянии термической постобработки на свойства напечатанных методом FDM изделий, приводимых в литературе, позволяет констатировать:

1. Термическая постобработка (отжиг) в сочетании с оптимизацией параметров процесса печати позволяет существенно улучшать свойства напечатанных изделий.

2. Термическая постобработка может повлиять на допуски по размерам и даже привести к недопустимым деформациям готового изделия.

3. Во избежание деформаций во время термической постобработки целесообразно помещать образцы в специально разрабатываемые формы, заполняемые порошками различного состава для фиксации размеров по всем осям.

4. В качестве фиксирующего порошка предпочтительно использовать поваренную соль, т.к. это недорогой, легко измельчаемый, нетоксичный и устойчивый к технологическим температурам материал. Кроме этого, по окончании процесса отжига соль гораздо легче удаляется с поверхности образцов, чем другие материалы.

5. Перспективным с точки зрения улучшения физико-механических свойств и качества поверхности изделий, полученных методом FDM-печати, является метод термической постобработки в закрытых формах с приложением давления к испытываемым образцам.

## **Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования**

По результатам анализа состояния вопроса, проведенного в первой главе, можно сделать следующие выводы:

1. Традиционные методы изготовления изделий (механическая обработка, литье, прессование) обладают ограничениями обрабатываемых изделий; имеют низкий коэффициент использования материала, требуют проектирования и изготовления специальной оснастки.

2. Аддитивные технологии широко используются для изготовления изделий с заданными характеристиками, которые затруднительно, а часто и невозможно изготовить с помощью обычного производственного процесса. Основное преимущество аддитивных технологий заключается в том, что изготовление

деталей не требует сложной инструментальной оснастки, такой как, например, литевая форма. Аддитивные технологии, в отличие от традиционных, позволяют повысить эффективность изготовления изделий и уменьшить материалоемкость за счет оптимизации конструкции, использования высокоэффективных материалов. Формирование конструкции получается за одну технологическую операцию, и концепция внутреннего заполнения позволяет сократить количество операций на изготовление изделия и получить изделие меньшей массы при выполнении заданных характеристик.

3. Среди известных на сегодняшний день методов 3D-печати метод FDM (Fused-Deposition Modeling) является самым популярным в мире благодаря способности легко адаптироваться под любые задачи и максимально быстро запускать изделия сложной геометрии в производство при минимальных затратах.

4. К наиболее распространенным материалам, используемым в качестве термопластичных матриц, можно отнести такие полимеры, как акрилбутадиенстирол (АБС), полиамиды (ПА6 или ПА66), полипропилен (ПП), политетрафторэтилен (ПТФЭ) или их сочетание с другими добавками. При применении технологии FDM-печати решающее влияние на механические свойства и технологичность оказывает выбор материала. Одной из проблем, ограничивающих реализацию потенциальных возможностей FDM-печати, является отсутствие конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати и постобработки с целью уменьшения их материалоемкости при обеспечении заданных характеристик.

5. Из всех параметров процесса FDM-печати угол наклона раstra, ориентация печати и процент заполнения являются ключевыми, оказывающими наибольшее влияние на механические свойства и анизотропию образцов. В настоящее время отсутствуют научно обоснованные зависимости, позволяющие подобрать рациональные режимы печати в зависимости от технических требований к изделию.

6. Даже при оптимальных параметрах печати изделия, изготовленные методом FDM-печати, обладают ярко выраженной анизотропией свойств, что не

позволяет добиться качества монолитного изделия в отличие от традиционных методов обработки. Для улучшения физико-механических свойств изделий, изготовленных методом FDM-печати, применяют методы дополнительной обработки, которые позволяют приблизить физико-механические характеристики изделий, изготовленных методом FDM, к изделиям, изготовленным методами литья и прессования. Научные публикации, посвященные применению методов постобработки, ориентированы только на элементарные образцы. В связи с этим особенно актуально разработка технологии постобработки, направленная непосредственно на реальные изделия.

На основе проведенного анализа поставлена цель диссертационного исследования – повышение эффективности изготовления изделий с заданными характеристиками путем разработки конструкторско-технологически обоснованных режимов FDM-печати. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Анализ современного состояния технологий производства изделий с заданными характеристиками, возможностей и особенностей метода FDM-печати, методов постобработки.

2. Разработка структуры конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати, обеспечивающих уменьшение материалоемкости изделий при гарантированном обеспечении заданных характеристик.

3. Разработка способа определения фактических значений характеристик изделия с использованием моделей микромеханики, позволяющих определить эффективные значения физико-механических свойств при различных степенях заполнения в виде аналитических зависимостей.

4. Обоснование рациональных технологических режимов FDM-печати с использованием многофакторного эксперимента в виде нелинейных уравнений регрессии для зависимостей свойств изделия от температуры и скорости печати, а также высоты слоя.

5. Исследование влияния постобработки на физико-механические свойства изделий, изготовленных методом FDM-печати.

6. Применение разработанной структуры конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати при производстве изделий с заданными характеристиками.

7. Использование результатов исследования на производстве и в учебном процессе.

## ГЛАВА 2. СТРУКТУРА КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ РЕЖИМОВ FDM-ПЕЧАТИ ИЗДЕЛИЙ С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В настоящее время общие принципы и этапы конструирования изделий для аддитивных технологий описаны в ГОСТ 59037. Данный стандарт ограничивает реализацию потенциальных возможностей FDM-печати и предназначен для металлических изделий [141-143].

На рисунке 22 представлена базовая структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками.

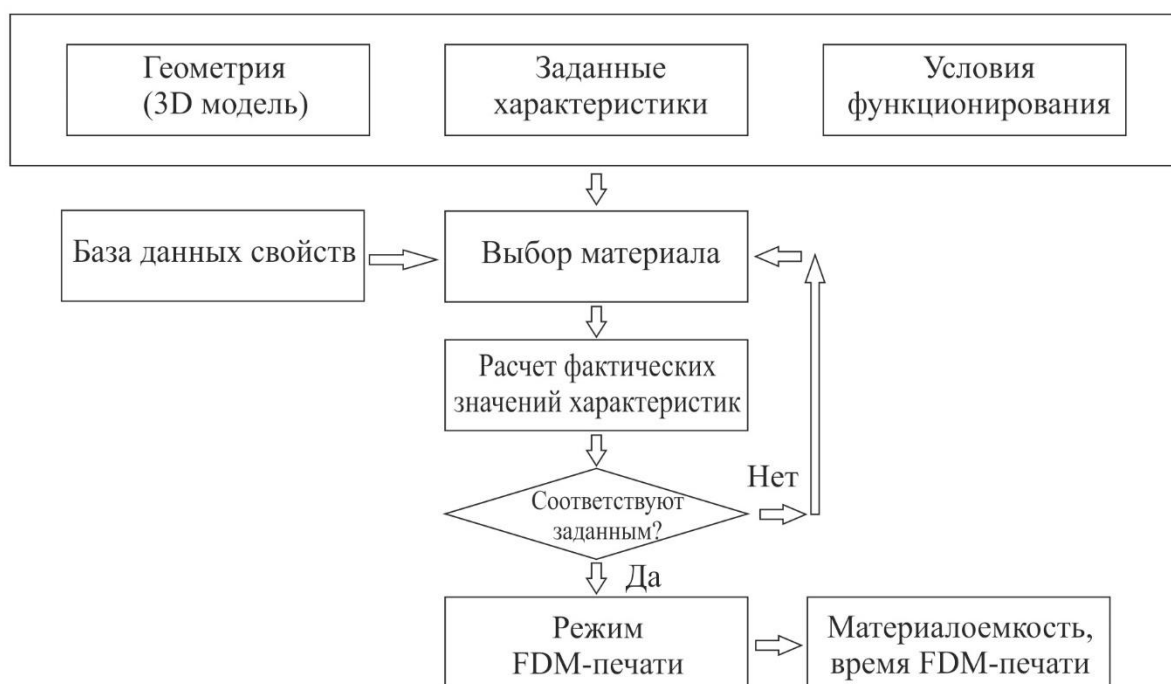


Рисунок 22 – Базовая структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками [144]

Поэтому актуальной задачей является разработка структуры конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными

характеристиками, эффективно учитывающей возможность и особенности процесса.

На рисунке 23 представлена разработанная структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками.

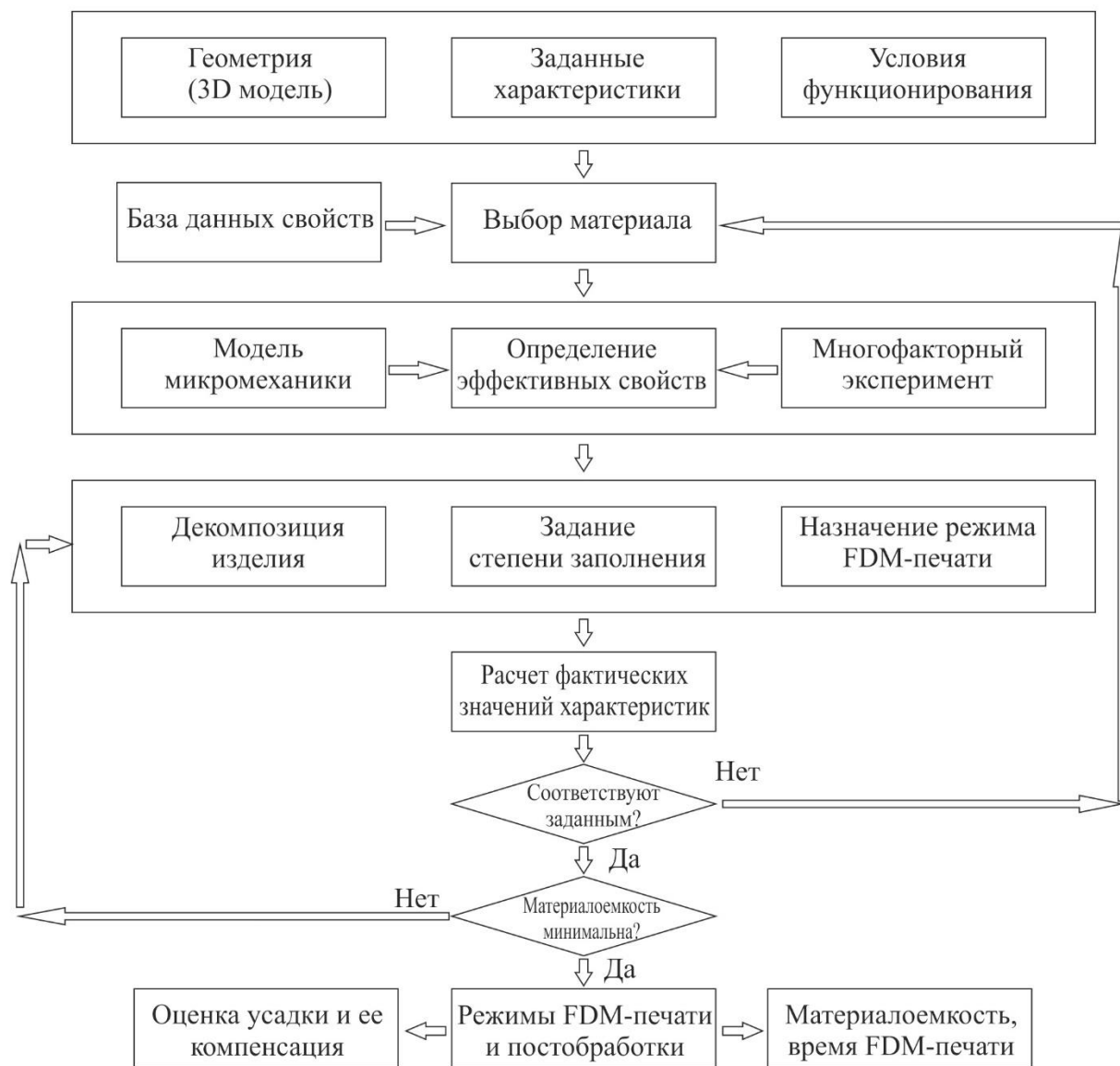


Рисунок 23 – Разработанная структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками

Разработанная структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати включает оптимизацию конструкций, выбор материалов,



определение технологических схем, режимов печати и последующей дополнительной обработки, а также позволяет уменьшать материалоемкость изделия при обеспечении заданных характеристик.

## **2.1 Структура конструкторского обоснования режимов FDM-печати**

При разработке структуры конструкторского обоснования режимов FDM-печати решаются следующие задачи:

- выбор материала для FDM-печати;
- оценка свойств исходного материала;
- улучшение свойств исходного материала;
- формирование конструкции изделия с учетом специфики FDM-печати;
- уменьшение массы изделия путем изменения степени заполнения внутреннего объема с учетом технических требований к изделию.

Данная структура включает в себя выбор материала, рациональный выбор конструкции и внутреннего заполнения с учетом специфики FDM-печати, проведение моделирования и расчетов оценки достижения заданных характеристик.

### **2.1.1 Выбор материала для FDM-печати**

Исходное сырье для FDM-печати представляет собой нить (филамент), обычно изготовленную из термопластичного материала, характеризующуюся бесконечной длиной по отношению к поперечному сечению. В настоящее время промышленно выпускаются нити диаметром 1.75 и 2.85 мм. При выборе материала следует ориентироваться в первую очередь на технические требования на изделие. Соблюдение прочностных и температурных требований в процессе эксплуатации изделия является основным. Последующее ранжирование материала заключается в доступности и стоимости материала.

Из разнообразия термопластов, применимых для FDM-печати, можно выделить высокоэффективные материалы, которые обладают высокой химической стойкостью и прочностными характеристиками, но при этом являются труднодоступными и дорогими.

### 2.1.2 Оценка свойств исходного материала

При конструкторском обосновании режимов FDM-печати необходимо учитывать качество сырья, для чего проводится оценка термических характеристик выбранного для печати материала. К основным термическим характеристикам относят: температуру стеклования; температуру кристаллизации; температуру плавления; начальную температуру деструкции; конечную температуру деструкции; показатель текучести расплава.

При исследовании большинства теплофизических характеристик материалов широко используется метод термического анализа, называемый дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), который основан на измерении теплового потока между исследуемым образцом и эталоном в контролируемых температурных условиях [145]. Общие требования к ряду методов ДСК для термического анализа полимеров и смесей полимеров регламентируются стандартами [146-148].

Однако во многих случаях приборы для ДСК формируют данные, которые зависят от особенностей конструкции прибора и массы образца, что существенно затрудняет анализ и интерпретацию результатов ДСК. В частности, в ГОСТе рекомендует при существенной кривизне базовой линии прибора в заданном интервале температур, производить вычитание из зарегистрированной кривой ДСК образца базовой линии прибора, которая получается в результате испытаний с пустыми тиглями.

На рисунке 24 представлена схема коррекции кривой ДСК с целью исключения влияния конструкции прибора на результаты измерений.

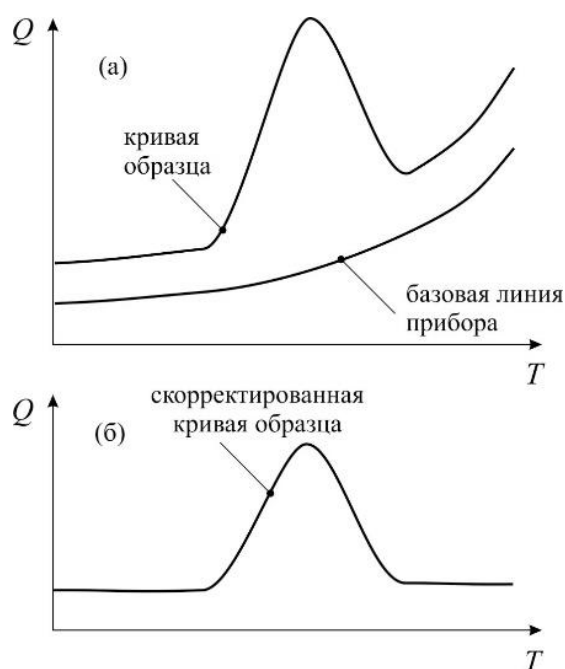


Рисунок 24 – Зависимости теплового потока от температуры: (а) кривые, регистрируемые прибором; (б) скорректированная кривая образца, полученная в результате вычитания базовой линии прибора

Результаты измерений сохраняются в тестовых файлах, имеющих различные структуры, в которых записываются значения времени, температуры и теплового потока. Кроме того, в файле может содержаться информация о массе образца. Количество наборов значений измеряемых величин для базовой линии прибора и образца различаются, так же отличаются и значения времени и температуры. В результате этих отличий невозможно прямое получение скорректированной кривой образца при вычитании значений теплового потока. Для устранения этой проблемы осуществляется интерполяция базовой линии прибора кривой Безье.

$$P(s) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(s) \quad (2)$$

где  $B_{i,n}(s)$  - полином Бернштейна степени  $n$ ;  $P(s)$  – точка на кривой Безье;  $P_i$  контрольная точка кривой Безье;  $s$  – параметр кривой Безье.

Полиномы Бернштейна задаются следующим соотношением:

$$B_{i,n}(s) = \frac{n!}{i!(n-i)!} (1-s)^{n-i} s^i, \quad i = 0, \dots, n \quad (3)$$

Учитывая, что параметр  $s$  изменяется от 0 до 1, для значений параметра в контрольных точках выполняются следующие соотношения.

$$P_k = P(s_k) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(s_k) \quad (4)$$

где  $s_k$  – значение параметра кривой Безье в контрольной точке;  $P_k$  – экспериментальное значение теплового потока в точке  $k$ .

В результате решения системы линейных уравнений (4) определяются значения контрольных точек параметрической кривой Безье  $P_i$ . После этого с использованием соотношения (2) можно определить уравнение интерполирующей кривой.

Другая особенность данных ДСК заключается в том, результаты зависят от массы образца и значения коэффициента прибора, определяемого при калибровке по энтальпии. Для получения удельных значений теплового потока, не зависящих от конструкции прибора, используется следующее соотношение:

$$q = K \cdot Q/m \quad (5)$$

где  $Q$  – скорректированный тепловой поток;  $K$  – коэффициент прибора;  $m$  – масса образца.

При выполнении диссертационной работы с целью исключения влияния особенностей конструкции прибора за счет получения разницы между кривыми ДСК образца и прибора с пустыми тиглями и расчета удельных характеристик ДСК, не зависящих от массы образца, была разработана «Программа для математической обработки данных дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК)» [149].

Работа программы осуществляется по следующему алгоритму. Обработка данных ДСК производится с использованием интерполяции базовой линии прибора кривой Безье и определения разницы значений кривой ДСК образца и интерполирующей кривой Безье при одинаковых значениях температуры, затем рассчитываются удельные характеристики ДСК, не зависящие от массы образца. На рисунке 25 представлены кривые ДСК базовой линии прибора и образца.

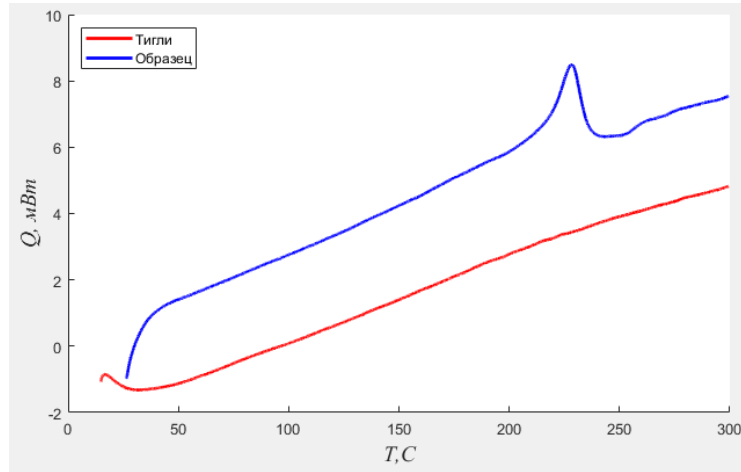


Рисунок 25 – Кривые ДСК базовой линии прибора и образца

На рисунке 26 представлены кривые ДСК с точками интерполяции и параметрической кривой Безье.

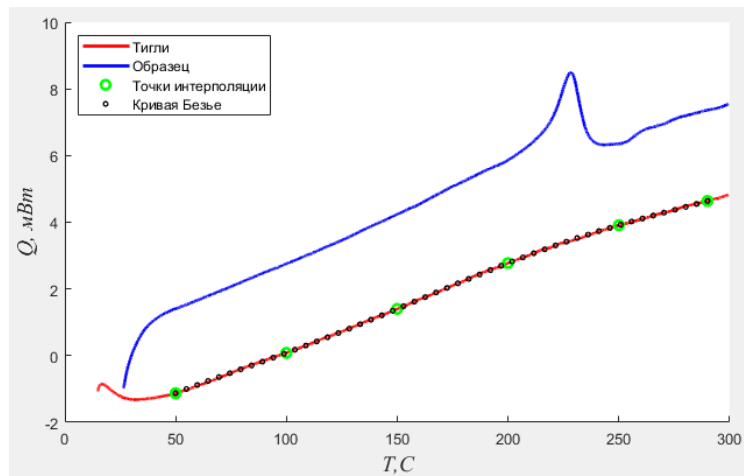


Рисунок 26 – Кривые ДСК с точками интерполяции и параметрической кривой Безье

Результаты расчета сохраняются в виде последовательности строк. В каждой строке располагается по четыре числа:

$$\begin{array}{cccc}
 1 & t_1 & T_1 & q_1 \\
 \hline
 i & t_i & T_i & q_i \\
 \hline
 N & t_N & T_N & q_N
 \end{array}$$

Первое число соответствует номеру отсчета, второе и третье числа обозначают время и температуру в точке отсчета, а четвертое число обозначает. Таким образом, программа позволяет эффективно осуществлять математическую обработку данных дифференциальной сканирующей калориметрии.

### **2.1.3 Улучшение свойств исходного материала**

В настоящее время выпускаются нити диаметром 1,75 и 2,85 мм. В большинстве случаев при использовании промышленно выпускаемого материала для улучшения его свойств используется только предварительная сушка филамента. Для достижения лучших механических, оптических, тепловых и электрических характеристик по сравнению с чистыми полимерами в технологиях FDM-печати все чаще используют композиционные материалы на основе термопластичных матриц. В качестве наполнителей в таких материалах выступают углеволокно, стекловолокно, кевлар, дерево, металлический порошок и т.д. Армирование филаментов для 3D-печати непрерывными волокнами стало возможным благодаря использованию специальных принтеров с двумя соплами: одного с матричным полимером, другого с непрерывным волокном. В случае использования для печати композиционного филамента технология его получения оказывает существенное влияние на физико-механические свойства напечатанного изделия. Нагрев волокна перед вводом в сопло принтера и использование для печати предварительно пропитанных полуфабрикатов (препрегов) помогают увеличить степень пропитки волокна материалом матрицы и, как следствие, улучшить механические характеристики готового изделия.

### **2.1.4 Формирование конструкции изделия с учетом специфики FDM-печати**

На данном этапе проводится анализ ключевых геометрических характеристик изделия, так как оборудование для FDM-печати имеет ограничения по размеру печатаемого изделия. Геометрические размеры детали влияют так же

на определение оптимальной ориентации в процессе печати, что в конечном итоге влияет на качество изделия. Прежде всего, необходимо оценить качество поверхности получаемой детали с учетом ограничений по толщине слоя. Кроме этого, геометрия изделия может быть проанализирована с точки зрения возможности изготовления изделия по частям с последующей сборкой. Изготовление отдельных частей изделия позволяет минимизировать количество поддержек, необходимых при печати фасонных поверхностей, сэкономив при этом материал и время печати. Для проведения полного геометрического анализа необходимо спроектировать модель изделия и провести ряд моделирований. Последующее ранжирование конструкции производится с учетом результатов моделирования и соответствия их техническим требованиям на изделие.

### **2.1.5 Методы подготовки CAD-модели**

Подготовка CAD-модели заключается в проектировании трехмерной модели будущего изделия с использованием систем автоматизированного проектирования, сохранении геометрии в формате STL и разбиении на слои с помощью специального программного обеспечения, называемого Slicer. В большинстве современных Slicer-программ используется автоматическое разбиение модели на слои одинаковой высоты, равной толщине слоя, выбранной для печати в зависимости от свойств материала. Для минимизации лестничного эффекта используется метод адаптивного разбиения на слои — специальный алгоритм, позволяющий изменять высоту слоя в зависимости от наличия в модели наклонных поверхностей. Чем больше угол наклона поверхности, тем меньшую высоту слоя выбирает программа при разбиении. Для вертикальных поверхностей назначается максимальное значение высоты слоя, поскольку для них не требуется большой детализации, и использование наибольшей высоты слоя не оказывает влияния на внешний вид, но существенно сокращает время печати. Адаптивное разбиение на слои позволяет значительно улучшать качество поверхности готового изделия при

незначительном увеличении времени печати, однако, этот алгоритм не во всех Slicer-программах работает корректно и зачастую требует ручной настройки.

### 2.1.6 Уменьшение массы изделия путем изменения степени заполнения внутреннего объема

Одним из преимуществ 3D-печати является возможность печати как сплошных, так и полностью или частично полых изделий. С точки зрения производства это не только снижает расход материалов, но и уменьшает конечную массу изделия.

Как правило, изделие представляет собой контур (оболочку) и внутреннюю область, называемую заполнением, с различными параметрами, к которым относятся: схема заполнения, плотность заполнения и межрастровый (воздушный) зазор. С точки зрения физико-механических свойств готового изделия наибольший интерес представляют параметры заполнения.

Схема заполнения представляет собой рисунок (шаблон) укладки растров во внутренней области печатаемого изделия. Выбор схемы заполнения обычно производится в зависимости от времени печати и требуемых физико-механических характеристик изделия. Существует два типа шаблонов заполнения: 2D и 3D. В программном обеспечении для 3D-печати, как правило, доступно множество шаблонов обоих типов [150]. На рисунке 27 представлены наиболее часто используемые 2D схемы заполнения.

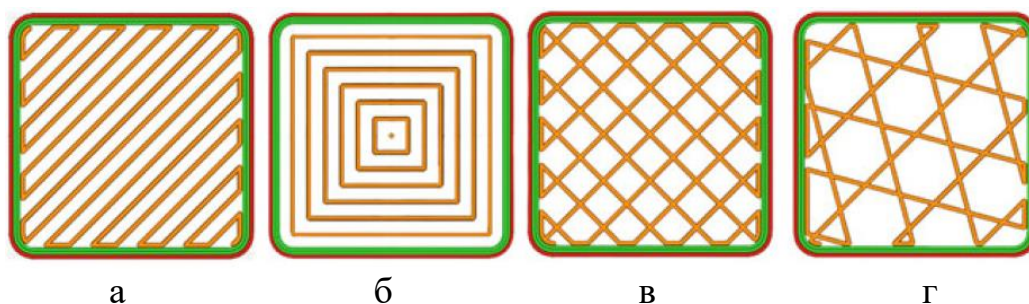


Рисунок 27 – Типовые 2D схемы заполнения для FDM-печати:

а – линейная; б – концентрическая; в – сетчатая; г – звездчатая [150]



Параметром, тесно связанным со схемой заполнения, является плотность заполнения – процентное соотношение заполнения внутренней области изделия материалом нити. Плотность может варьироваться от 0% (полностью пустотелая) до 100% (полностью твердая). Более высокая плотность заполнения обеспечивает более высокую прочность и вес детали. На рисунке 28 представлены различные варианты плотности заполнения для звездчатой схемы.

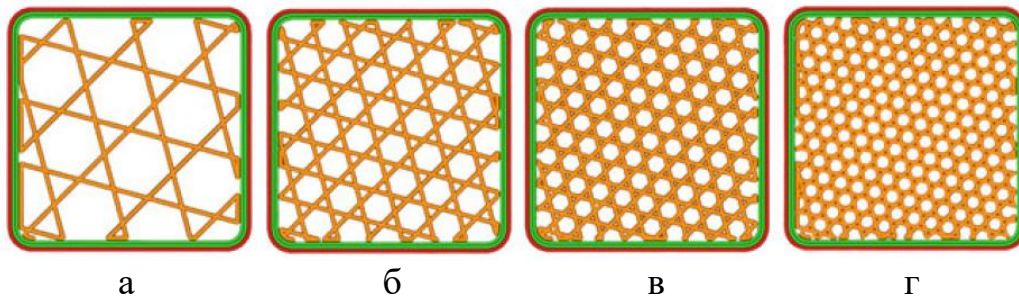


Рисунок 28 – Варианты плотности заполнения:

а – 20%; б – 40%; в – 60%; г – 80% [150]

Третьим параметром заполнения, оказывающим существенное влияние на физико-механические характеристики готового изделия, является межрастровый зазор – расстояние между соседними растрами в одном слое. Значение межрастрового зазора может быть положительным, нулевым или отрицательным (рисунок 29). Положительное значение зазора – расстояние  $\delta$  между двумя соседними слоями (рисунок 29, а). В случае нулевого зазора два соседних растра соприкасаются,  $\delta$  при этом равно 0 (рисунок 29, б). При отрицательном зазоре соседние растры перекрывают друг друга на заданное значение  $\delta$  (рисунок 29, в).

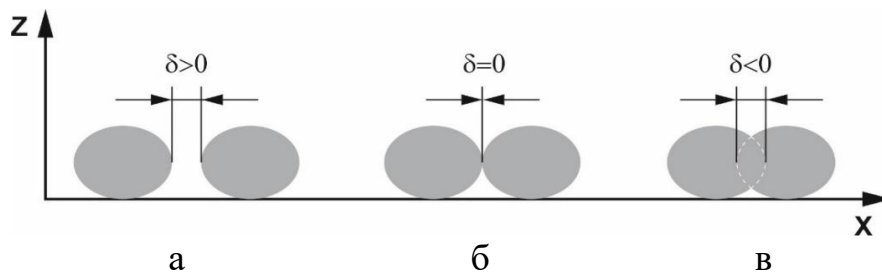


Рисунок 29 – Различные варианты значений межрастрового зазора  $\delta$ :

а – положительное; б – нулевое; в – отрицательное

Очевидно, что при положительном зазоре создается менее плотная внутренняя структура, а время печати уменьшается. Наоборот – отрицательный зазор обеспечивает относительно плотную структуру при большем времени печати. Для улучшения механических свойств предпочтителен нулевой или отрицательный межрастровый зазор.

Ранжирование по процентному заполнению заключается в технических требованиях на изделие по прочности и массе. Ранжирование по рисунку заполнения заключается в соблюдении нагрузок, действующих на изделия. Сложность задачи в выборе оптимального процента заполнения заключается в определении эффективных характеристик изделия при разной степени заполнения. С уменьшением степени заполнения изменяются эффективные характеристики изделия. Под эффективными характеристиками понимаются в данном случае модуль упругости, коэффициент Пуассона, модуль сдвига.

Схема оценки эффективных характеристик материала представлена на рисунке 30.

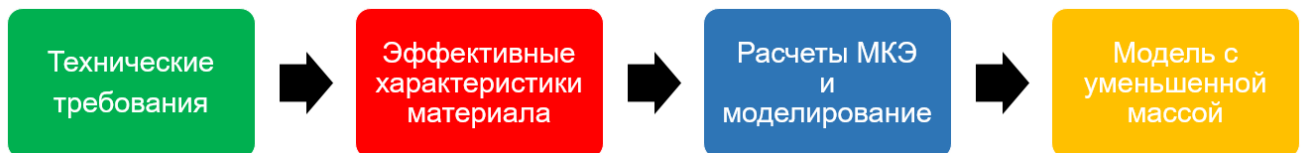


Рисунок 30 – Схема оценки эффективных свойств материала

Разработка способа определения фактических значений характеристик изделия с использованием моделей микромеханики, позволяющих определить эффективные значения физико-механических свойств при различных степенях заполнения в виде аналитических зависимостей, будет проведена в третьей главе.

## 2.2 Структура технологического обоснования режимов FDM-печати

Структура технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками включает в себя:

- выбор режимов FDM-печати в зависимости от требований к изделию;
- выбор методов и параметров постобработки;
- оценку величины усадки в результате FDM-печати и постобработки.

Режимы печати и постобработки определяются экспериментально. Рациональные режимы печати позволят снизить материалоемкость, а рациональные методы и режимы постобработки позволят улучшить физико-механические свойства изделия.

### **2.2.1 Обоснование режимов FDM-печати**

Как показал анализ, проведенный в первой главе, FDM-технологии и позволяют регулировать большое количество параметров, для печати стабильного изделия с заданными свойствами эти режимы необходимо оптимизировать, а любое, даже незначительное, их изменение может привести к значительным, не всегда положительным, изменениям механической прочности и качества готового изделия. Поэтому для реальных изделий при выборе параметров печати чаще всего используют рекомендации поставщиков материала, настройки, заложенные в программном обеспечении 3D-принтера для конкретного материала, или печать тестовых образцов.

Сложность задачи в выборе рациональных параметров печати состоит в том, что они определяются экспериментально или по рекомендации производителя, и в настоящее время отсутствуют универсальные методики, позволяющие прогнозировать характеристики, изменяя режимы печати. Построение регрессионных зависимостей физико-механических свойств изделия от параметров процесса FDM-печати позволит однозначно и обоснованно выбирать режимы печати.

Исследования взаимосвязи параметров процесса FDM-печати и физико-механических характеристик образцов, разработка на их основе регрессионных зависимостей проведены в четвертой главе.

### **2.2.2 Обоснование методов и режимов постобработки**

Как показал анализ, проведенный в первой главе, в настоящее время отсутствует полное и четкое описание методов постобработки. Как следствие, отсутствуют рекомендации по выбору технологии дополнительной обработки, направленной на улучшение свойств конкретных изделий. В результате литературного анализа наиболее эффективным методом является термическая постобработка, которая приводит к улучшению физико-механических свойств изделия. Методы термической постобработки (отжиг) можно разделить на три группы:

- отжиг в дисперсной среде;
- отжиг в жесткой форме;
- отжиг в эластичной оболочке.

Исследования для определения взаимосвязи физико-механических характеристик готового изделия с методом и параметрами постобработки выполнены в четвертой главе.

### **2.2.3 Оценка величины усадки**

Величину усадки, возникающей в изделии, после печати или вследствие постобработки, можно определить экспериментальным путем с использованием лазерных сканеров по следующему алгоритму. Для определения величины усадки образец сканируется дважды по окончании процесса печати (усадка вследствие печати) и после постобработки (усадка вследствие постобработки), а затем сравнивается с исходной 3D-моделью. В результате сравнения размеров изделия после печати и после постобработки корректируется 3D-модель печатаемого изделия с целью соблюдения требований к геометрии и размерам готового изделия. Принятая схема учета и компенсации усадки с помощью лазерного сканера представлен на рисунке 31.

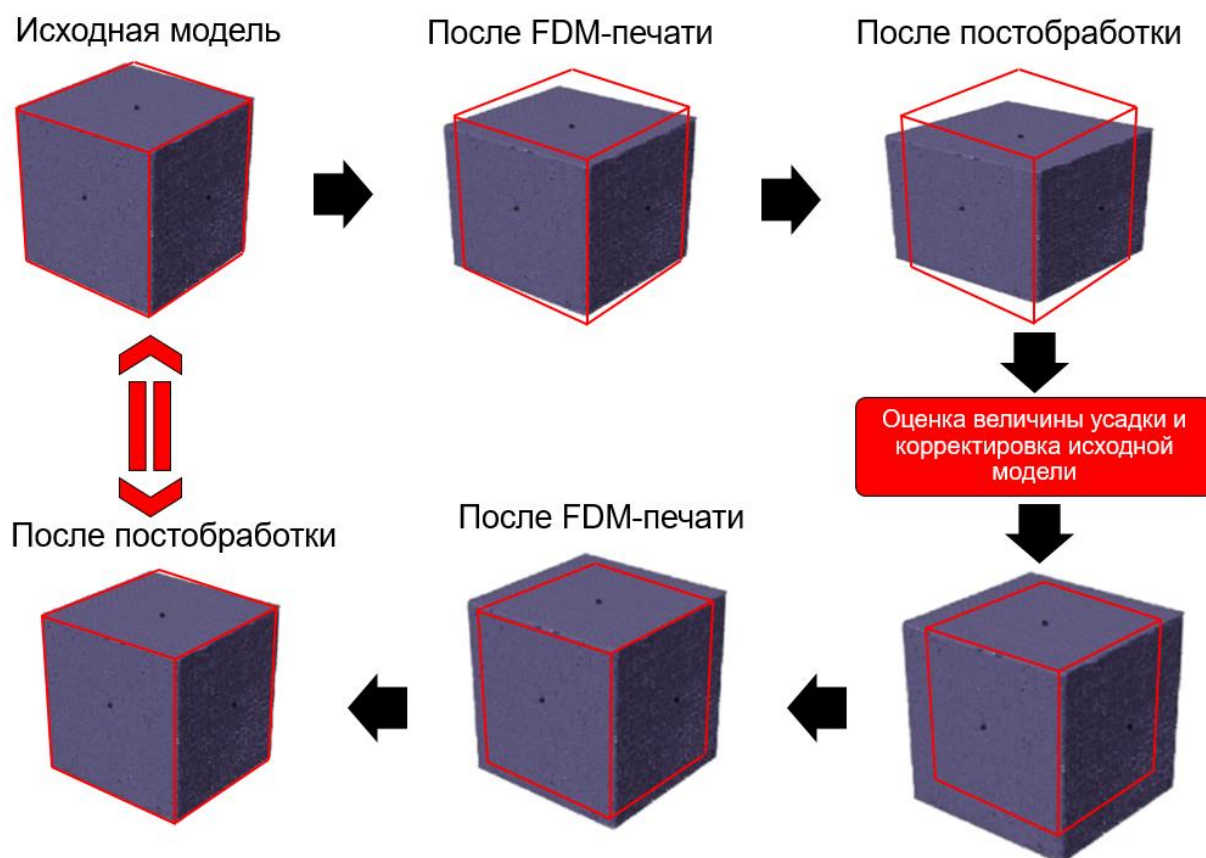


Рисунок 31 – Принятая схема учета и компенсации усадки

## Выводы по главе 2

По результатам работ, проведенных во второй главе, можно сделать следующие выводы:

1. Разработана структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий, обеспечивающих уменьшение материалоемкости изделий при гарантированном обеспечении заданных характеристик.

2. Разработана структура конструкторского обоснования режимов FDM-печати, включающая в себя:

- выбор материала с учетом технических требований;
- оценку свойств исходного материала методами термического анализа;
- улучшение свойств исходного материала;
- оценку геометрических характеристик изделия с учетом специфики FDM-печати;

- оценку возможности уменьшения степени заполнения внутреннего объема с учетом технических требований к изделию.

3. Разработана структура технологического обоснования режимов FDM-печати, включающая в себя:

- выбор параметров FDM-печати;
- выбор методов и параметров постобработки;
- оценку величины усадки в результате FDM-печати и постобработки.

4. Для реализации разработанной структуры конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками необходимы следующие исследования: моделирование и расчеты по определению эффективных характеристик изделия для FDM-печати при разной степени заполнения; построение регрессионных зависимостей физико-механических свойств от параметров печати; исследование влияния постобработки на физико-механические свойства изделия.

### ГЛАВА 3. КОНСТРУКТОРСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ FDM-ПЕЧАТИ ИЗДЕЛИЙ С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

FDM-печать позволяет получать изделия сложной геометрической формы, а также экономить на использовании материала, что в свою очередь приводит к экономии временных ресурсов, а также к возможности производить изделия небольшой массы за счет замены металлов на полимерные материалы и композиты на их основе, а так же за счет изменения степени заполнения внутреннего объема. На рисунке 32 представлена взаимосвязь степени заполнения, массы изделия и технических требований (прочности).

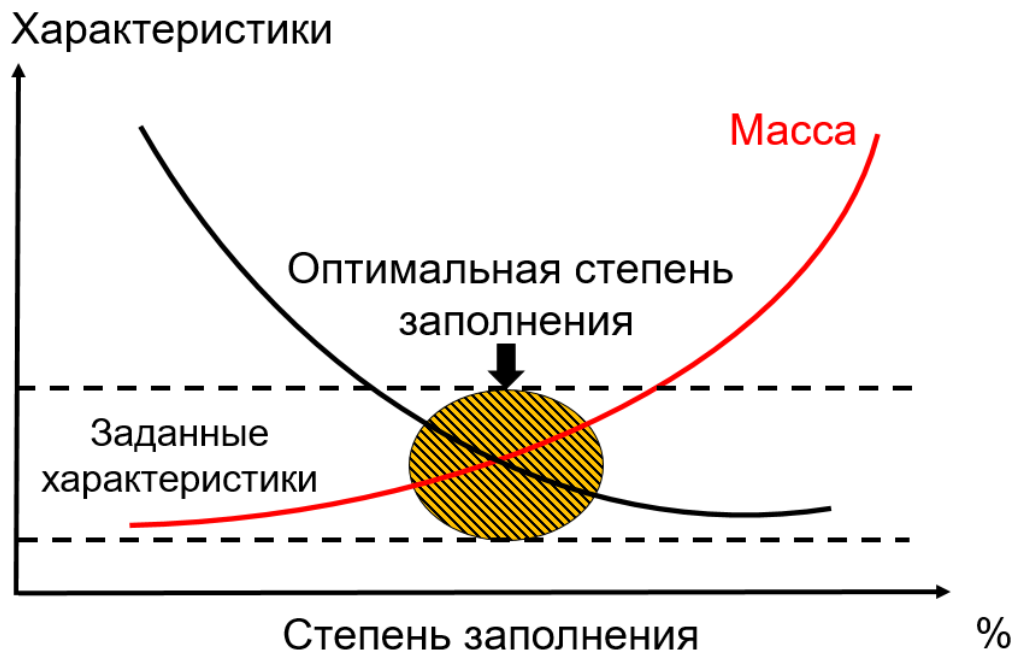


Рисунок 32 – Взаимосвязь степени заполнения, массы изделия и технических требований

Очевидно, что при изменении степень заполнения изменяется не только масса изделия, но и его эффективные свойства (модуль упругости, модуль сдвига, коэффициент Пуассона). Поэтому необходима разработка модели, описывающей зависимость эффективных характеристик материала от величины степени заполнения.

### 3.1 Определение эффективных характеристик материала изделия

Для определения фактических характеристик изделия с различным заполнением для FDM-печати разработана модель на основе метода асимптотического осреднения, предполагающего, что материал изделия имеет периодически повторяющуюся структуру, образованную набором минимальных элементов. На рисунке 33 представлена ячейка периодичности, принятая при разработке модели.



Рисунок 33 – Ячейка периодичности, принятая при разработке модели [143]

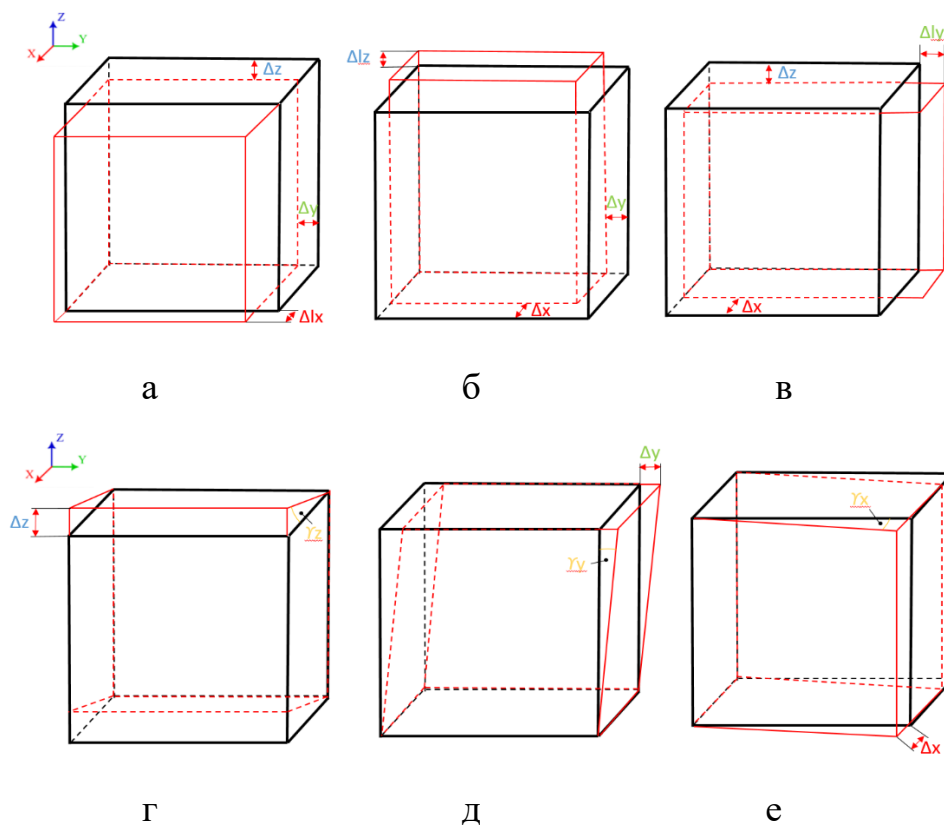


Рисунок 34 – Схемы моделирования различных вариантов нагрузки:

а, б, в – растяжение, г, д, е – сдвиг



Уравнения равновесия:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0;\end{aligned}\quad (6)$$

Между компонентами деформаций существуют зависимости, приведенные ниже:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{du}{dx}; \tau_{xy} = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \\ \varepsilon_y &= \frac{dv}{dy}; \tau_{xz} = \frac{dv}{dz} + \frac{dw}{dy} \\ \varepsilon_z &= \frac{dw}{dz}; \tau_{xz} = \frac{du}{dz} + \frac{dw}{dx}\end{aligned}\quad (7)$$

где:  $\varepsilon$ ,  $\tau$  – нормальная и сдвиговая составляющие деформации;

Обобщенный закон Гука:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{13} & D_{23} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{14} & D_{24} & D_{34} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{15} & D_{25} & D_{35} & D_{45} & D_{55} & D_{56} \\ D_{16} & D_{26} & D_{36} & D_{46} & D_{56} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix}\quad (8)$$

или

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}\quad (8')$$

где  $D$  – матрица жесткости;  $C$  – матрица податливости.

Эффективные характеристики могут быть определены на основе численного решения задачи упругости для ячейки периодичности, на грани которой наложены условия периодичности, обеспечивающие отсутствие образования разрывов между соседними ячейками периодичности и взаимного перекрытия таких ячеек.

Граничные условия периодичности при растяжении:

$$u|_{x_2} = u|_{x_1} + \Delta x$$

$$v|_{y2} = v|_{y1} + \Delta y \quad (9)$$

$$w|_{z2} = w|_{z1} + \Delta z$$

Граничные условия периодичности при сдвиге:

$$\begin{aligned} u|_{z2} &= u|_{z1} + \Delta x \\ v|_{x2} &= v|_{x1} + \Delta y \end{aligned} \quad (10)$$

$$w|_{y2} = w|_{y1} + \Delta z$$

Кроме того, на ячейку периодичности накладывается условие отсутствие ее перемещения, как твердого тела.

В настоящее время наиболее распространенным способом определения упругих постоянных является их определение через отношение осредненных по объему модели величин напряжений и деформаций. Упрощенно этот способ может быть представлен как:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V} \int_V \sigma dv \quad (11)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon dv \quad (12)$$

где  $\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}$  – осредненные по объему напряжения и деформации соответственно, которые находятся интегрированием соответствующих компонентов тензоров напряжений и деформаций по объему.

$$\bar{C} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}} \quad (13)$$

Задача по определению эффективных характеристик материала рассмотрена в двух вариантах:

- в первом модель является приближенной, материал в ней считается изотропным со сферическим включением. Данная модель является простой и не требует никакой дополнительной информации о структуре взаимодействия слоев;

- во втором геометрия имитирует формирование слоев при FDM-печати. Для данной модели в дальнейшем будут проведены экспериментальные исследования для сопоставления экспериментальных и расчетных результатов.

### 3.2 Определение эффективных характеристик изотропного материала изделия в зависимости от степени заполнения

Для определения эффективных характеристик изотропного материала с использованием численных методов при различной степени заполнения применялась программа COMSOL Multiphysics.

Матрица податливости для изотропного материала имеет следующий вид:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Упругие характеристики изотропного материала характеризуются тремя параметрами:  $E$  – модуль упругости (модуль Юнга);  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $G$  – модуль сдвига.

Для моделирования была использована микромодель со сферическим включением, имитирующим степень заполнения, которая представлена рисунке 35.

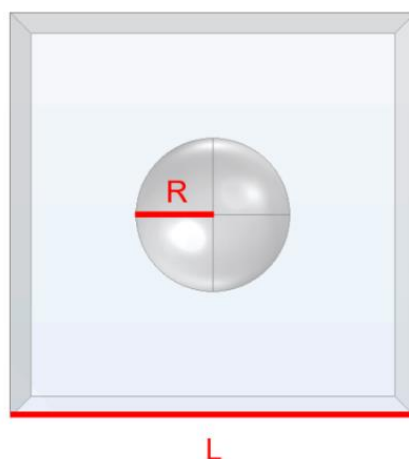


Рисунок 35 – Модель ячейки: L – сторона единичной ячейки, R - радиус включения

Высота сферического сегмента рассчитывается по формуле:

$$Hh = \left(R - \frac{L}{2}\right); R > \frac{L}{2}; Hh = 0; RM \leq \frac{L}{2} \quad (15)$$

Относительный объем рассчитывается по формуле:

$$V_h = \left(\frac{3}{4} * \pi R^3 - 6 * \pi * Hh^2 * \left(R - \frac{Hh}{3}\right)\right) / L^3 \quad (16)$$

Степень заполнения рассчитывается по формуле:

$$V = 1 - V_h \quad (17)$$

Для прогнозирования всех необходимых механических свойств выполняется шесть вариантов нагружения с различными типами и направлениями. С помощью моделирования определялись следующие характеристики: модуль упругости в трех направлениях  $E_x, E_y, E_z$ ; коэффициент Пуассона:  $\mu_{yz}, \mu_{xz}$  и  $\mu_{xy}$ ; модуль сдвига  $G_{yz}, G_{xz}$  и  $G_{xy}$ . В модели решалась стационарная задача с нагрузкой групп для ячейки периодичности. Результатом решения задачи было получение элементов матрицы жесткости  $\mathbf{D}$ . Для упрощения процедуры определения упругих характеристик материала, осуществлялось вычисление матрицы податливости:

$$\mathbf{C} = \mathbf{D}^{-1} \quad (18)$$

Затем с использованием соотношений определялись упругие характеристики по следующим соотношениям:

$$E_1 = 1/C_{11}, E_2 = 1/C_{33}, G_1 = 1/C_{44}, G_2 = 1/C_{55}, \mu_1 = -C_{12}E_1, \mu_2 = -C_{13}E_2 \quad (19)$$

Определение эффективных характеристик осуществлялось численно, методом конечных элементов. Предварительно были проведены тестовые расчеты для определения параметров сетки. В первом случае сетка разбивалась на 5 тысяч элементов, во втором – на 30 тысяч, в третьем – на 50 тысяч. При дальнейшем увеличении числа конечных элементов наибольшее изменение элементов матрицы жесткости составляет 1%, то есть увеличения количества конечных элементов не требуется. Для обеспечения точности была использована сетка конечных элементов на 30 тысяч элементов, представленная на рисунке 36.

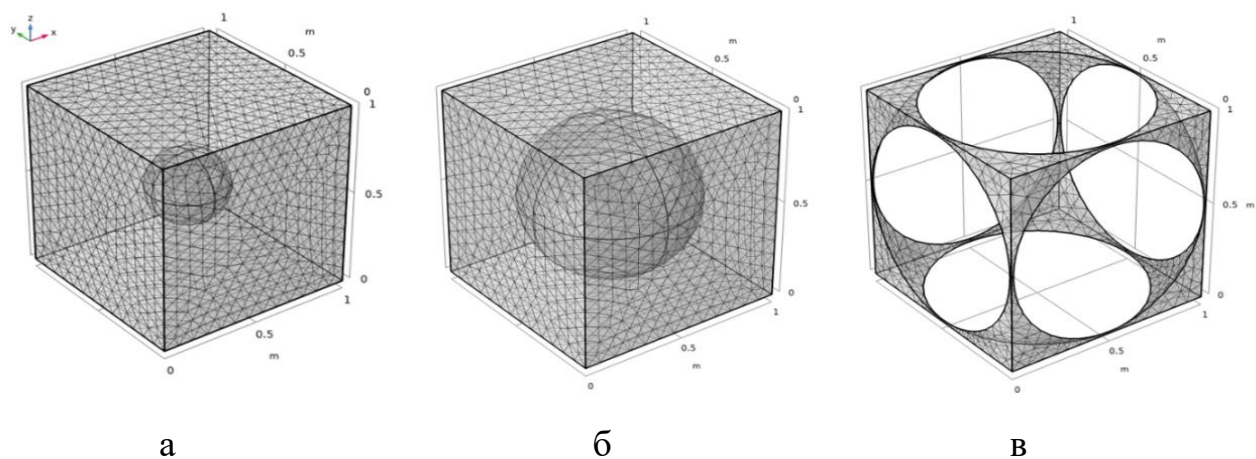


Рисунок 36 – Сетка, используемая для моделирования при различной степени заполнения: а – 90%; б – 50%; в – 10%

На рисунке 37 представлены результаты моделирования для различных значений степени заполнения.

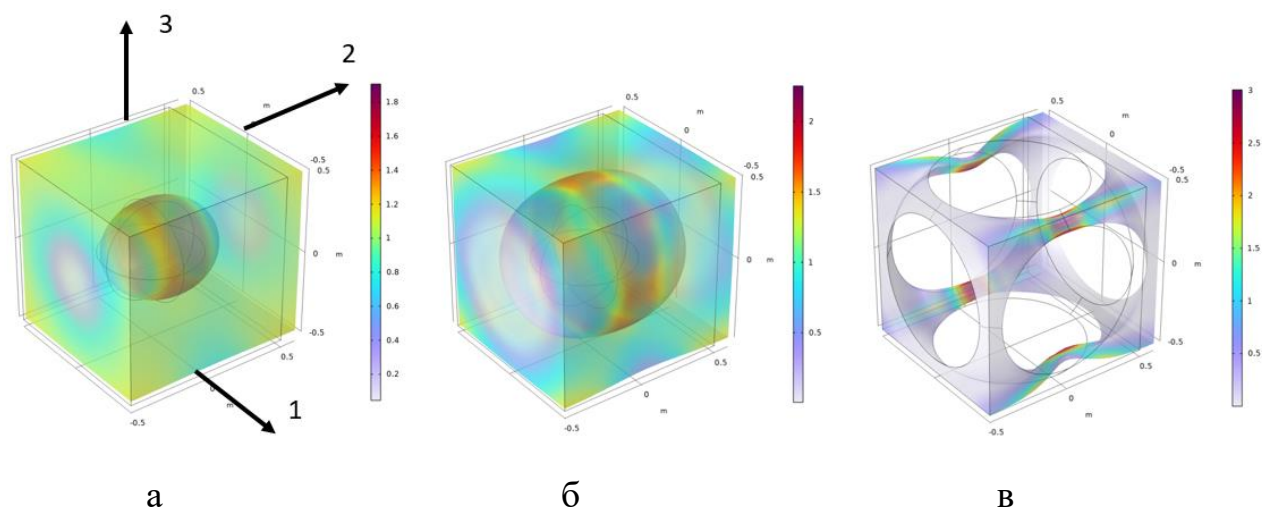


Рисунок 37 – Результаты численного моделирования распределения механических напряжений для различных значений степени заполнения:

а – 90%; б – 50%; в – 10%

Результаты моделирования показывают, что напряжения в ячейке периодичности распределяются неравномерно, что может быть учтено введением коэффициента концентрации напряжений. Например, при растяжении ячейки периодичности по оси  $x$  при малой степени заполнения (рисунок 37в) в основном

деформируются части ячейки периодичности, прилегающие к 4 ребрам параллельным оси  $x$ , а остальные части ячейки, прилегающие к 8 ребрам, параллельным осям  $y$  и  $z$ , деформируются в малой степени. Результаты численного решения показывают, что максимальные напряжения при стремлении степени заполнения к нулю стремятся к значению в три раза, превышающему среднее напряжение, рассчитанное по объему ячейки периодичности, заполненному материалом. То есть предельное значение коэффициента концентрации напряжений при малых степенях заполнения стремится к 3, а при больших степенях заполнения концентрация напряжений мала, так что коэффициент концентрации напряжений можно принять равным 1. При промежуточных значениях степени заполнения коэффициент концентрации напряжений рассчитывался как отношение максимального напряжения к средней по объему материал величине напряжения.

В результате численного решения были получены эффективные значения модуля упругости, модуля сдвига, коэффициента Пуассона, а также значения коэффициента концентрации напряжений изотропного материала в зависимости от степени заполнения. Результаты микромеханического моделирования представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты микромеханического моделирования

$V, \%$	$\mu/\mu_m$	$E/E_m$	$G/G_m$	$K_{KH}$
100	0,999744	0,999743	0,999848	1
90	0,950311	0,831511	0,812166	1,87161459
80	0,892114	0,699976	0,640516	2,198745643
70	0,828234	0,584384	0,490158	2,427932726
60	0,757391	0,475288	0,360428	2,599684914
50	0,665203	0,363051	0,2428	2,731796699
40	0,521179	0,246221	0,135074	2,832811979
30	0,410789	0,16344	0,070585	2,907739973
20	0,286386	0,090276	0,036974	2,959591794
10	0,11223	0,02978	0,004951	2,989958787

По полученным данным были построены графики зависимостей эффективных характеристик изотропного материала от степени заполнения (рисунки 38 – 41).

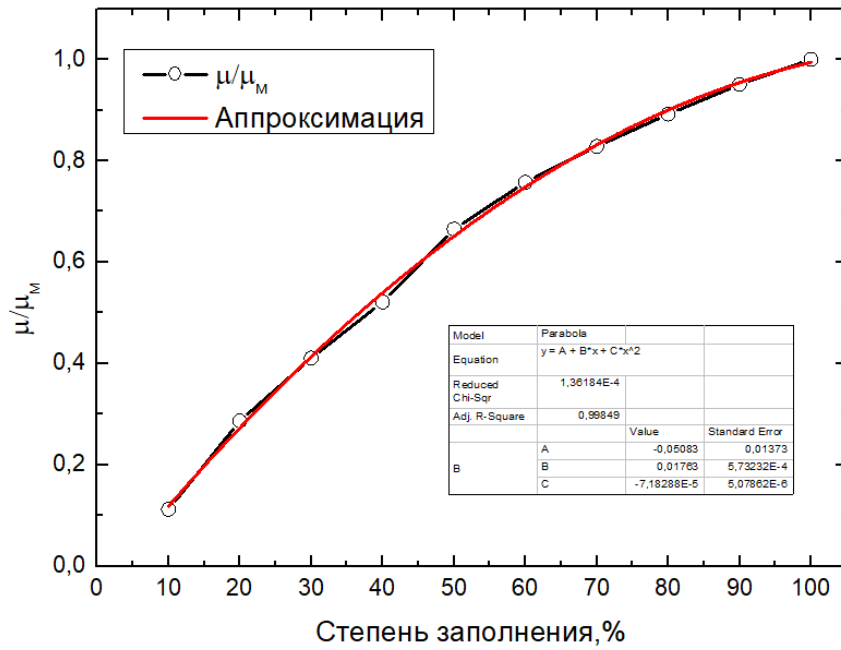


Рисунок 38 – Зависимость эффективного коэффициента Пуассона от степени заполнения, полученная по результатам численного моделирования

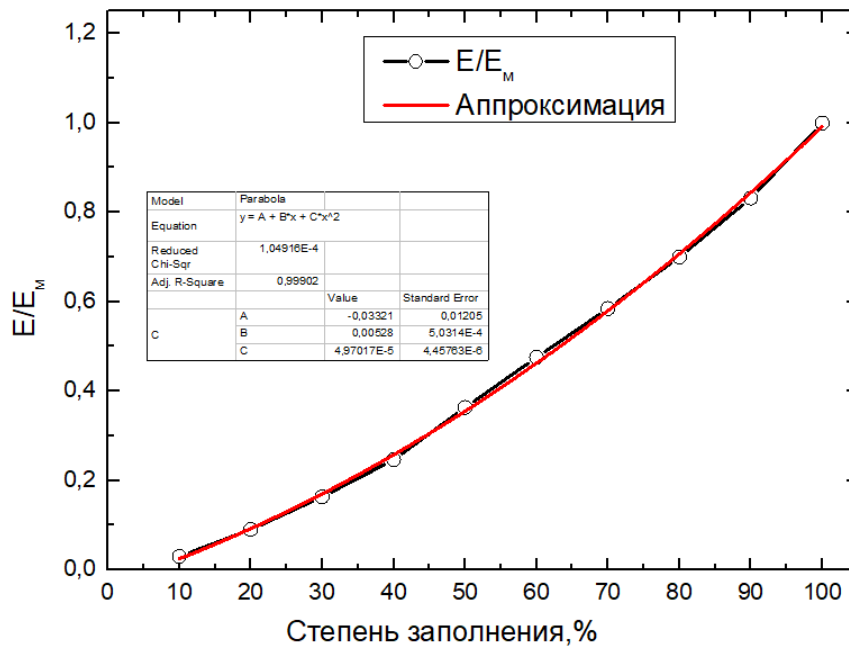


Рисунок 39 – Зависимость эффективного модуля упругости от степени заполнения, полученная по результатам численного моделирования

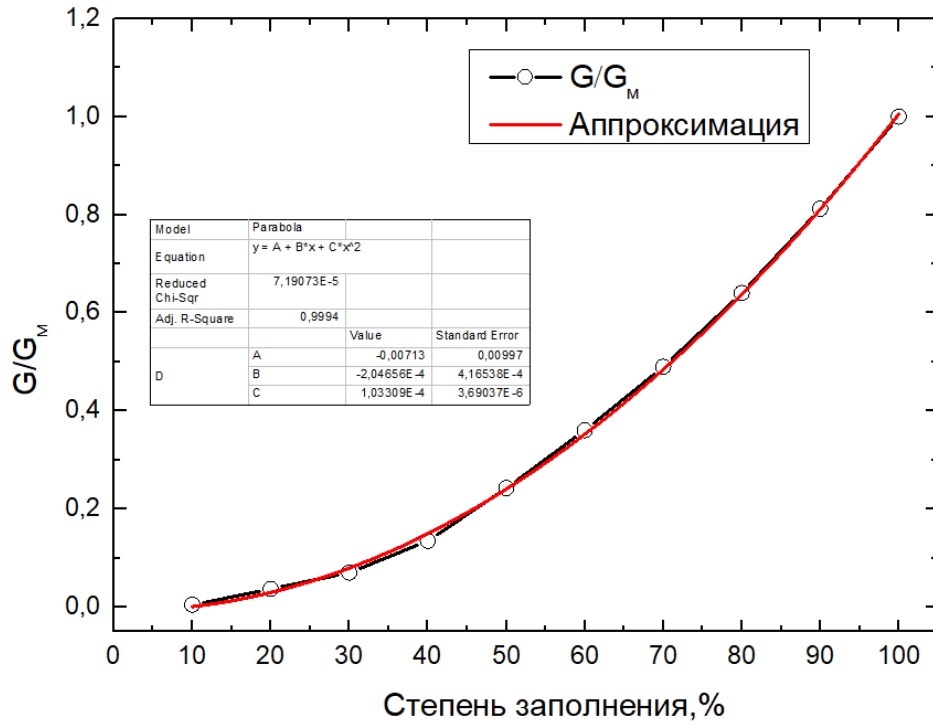


Рисунок 40 – Зависимость эффективного модуля сдвига от степени заполнения, полученная по результатам численного моделирования

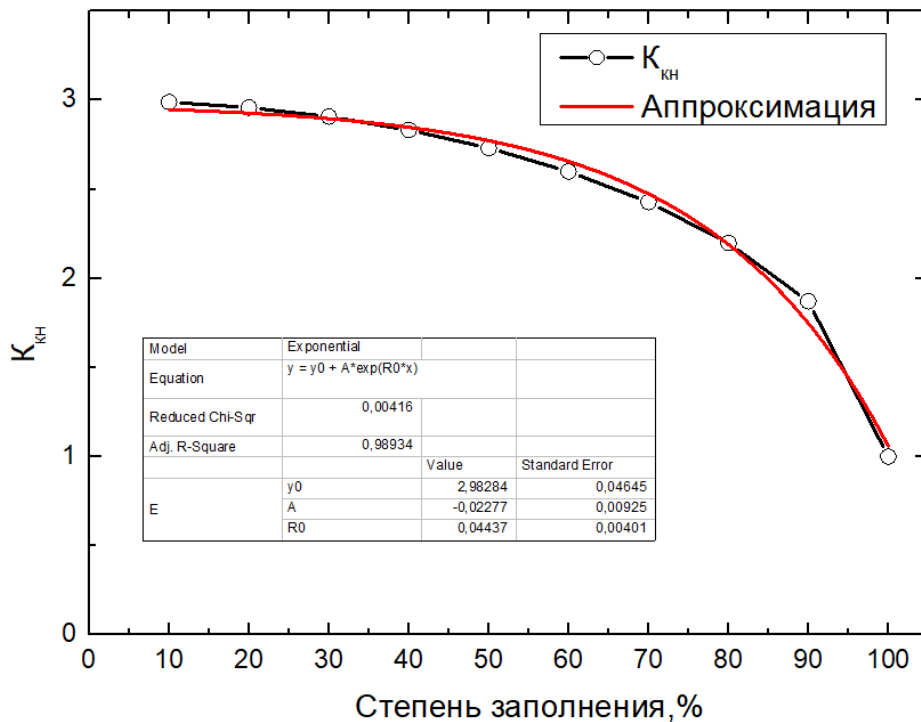


Рисунок 41 – Зависимость коэффициента концентрации напряжения от степени заполнения, полученная по результатам численного моделирования



Проанализировав графики и аппроксимации, эффективные характеристики изотропного материала в зависимости от степени заполнения можно рассчитать по формуле:

$$\frac{E}{E_M} = -0,03321 + 0,00528 * V + 0,0000497017 * V^2 \quad (20)$$

$$\frac{G}{G_M} = -0,00713 - 0,000204656 * V + 0,000103309 * V^2 \quad (21)$$

$$\frac{\mu}{\mu_M} = -0,05083 + 0,01763 * V - 0,0000718288 * V^2 \quad (22)$$

$$K_{KH} = 2,98284 - 0,02277 * \exp(0,0437 * V) \quad (23)$$

где:  $E_M$  – модуль упругости материала;  $G_M$  – модуль сдвига материала;  $\mu_M$  – коэффициент Пуассона.

Данная модель является простой, не требует никакой дополнительной информации о структуре взаимодействия слоев и позволяет сделать экспресс-оценку физико-механических свойств материала и определить фактические значения характеристик изделия.

### 3.3 Определение эффективных свойств ортотропного материала изделия в зависимости от степени заполнения

Для определения эффективных характеристик ортотропного материала была использована модель, имитирующая слои при FDM-печати при чередующемся направлении слоев  $0^\circ - 90^\circ$  (рисунок 42).

Матрица податливости для ортотропного материала имеет следующий вид:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\mu_{21}}{E_{22}} & -\frac{\mu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\mu_{32}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\mu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

В рассматриваемой модели выполняется равенство:  $E_{11}=E_{22}$ ,  $G_{23}=G_{13}$ ,  $\mu_{31}=\mu_{32}$ . То есть упругие характеристики ортотропного материала характеризуются шестью параметрами:

$E_{11}$  – модуль упругости в продольном направлении (в направлении печати или в слое);

$E_{33}$  – модуль упругости в направлении в поперечном направлении (в направлении перпендикулярном слою);

$G_{12}$ ,  $G_{23}$  – модули сдвига в соответствующих направлениях;

$\mu_{21}$ ,  $\mu_{31}$  – коэффициенты Пуассона в соответствующих направлениях.

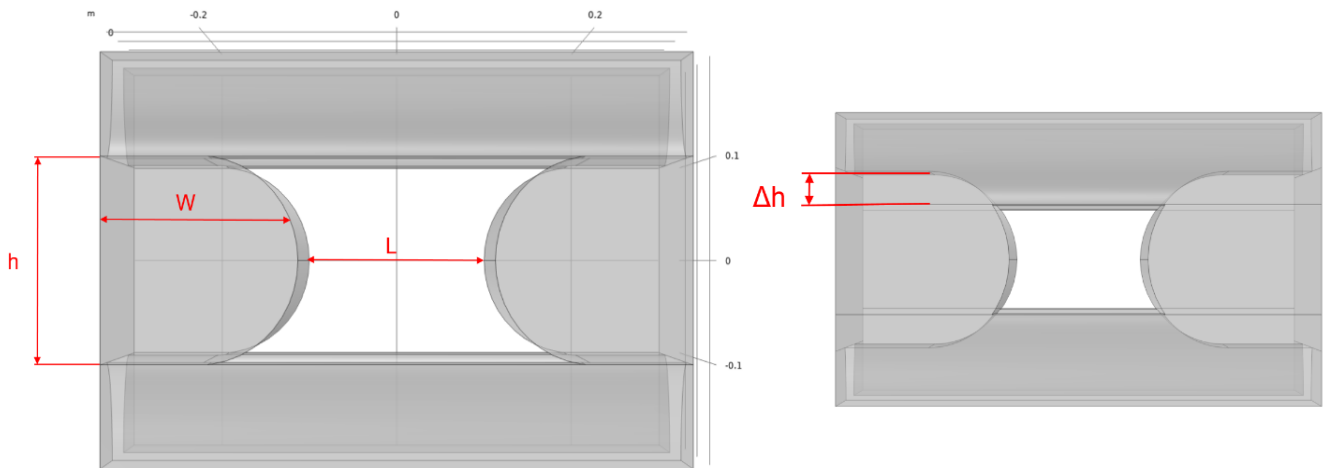


Рисунок 42 – Модель ячейки:  $h$  – высота слоя;  $W$  – ширина слоя;  $L$  – расстояние между линиями печати;  $\Delta h$  – перекрытие слоя

Степень заполнения  $V$  зависит от соотношения ширины и высоты печати ( $W$  и  $H$ ) и расстояния между проходами ( $L$ ). Значения  $V$  рассчитывались интегрированием по объему и делением на объем описанного параллелепипеда:

$$V = \frac{1}{L^2 * 2 * (h - \Delta h)} \quad (25)$$

Геометрия единичной ячейки при различных значениях степени заполнения представлена на рисунке 43.

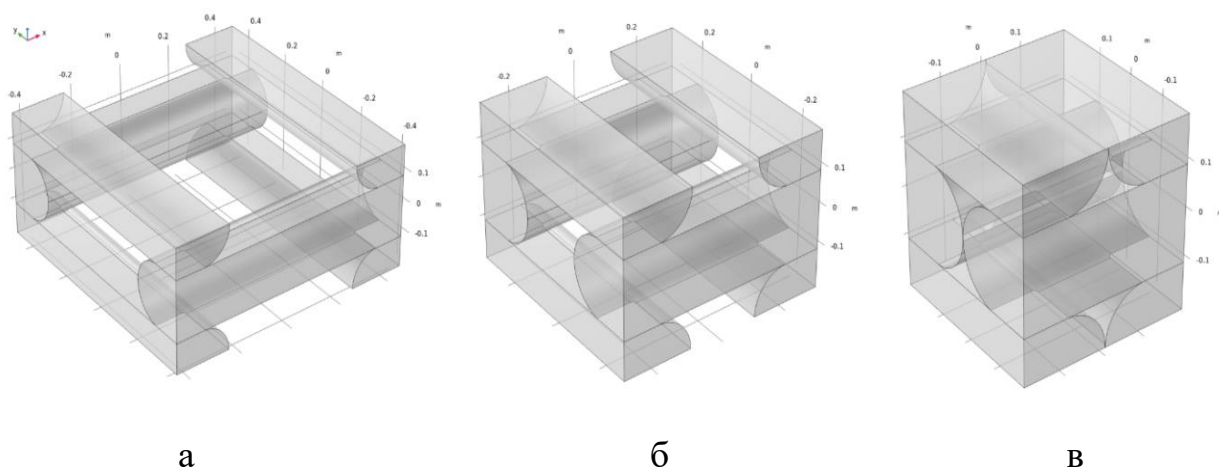


Рисунок 43 – Геометрия единичной ячейки при различных значениях степени заполнения: а – 10%; б – 50%; 100%

Для обеспечения точности была использована сетка конечных элементов на 30 тысяч элементов, представленная на рисунке 44.

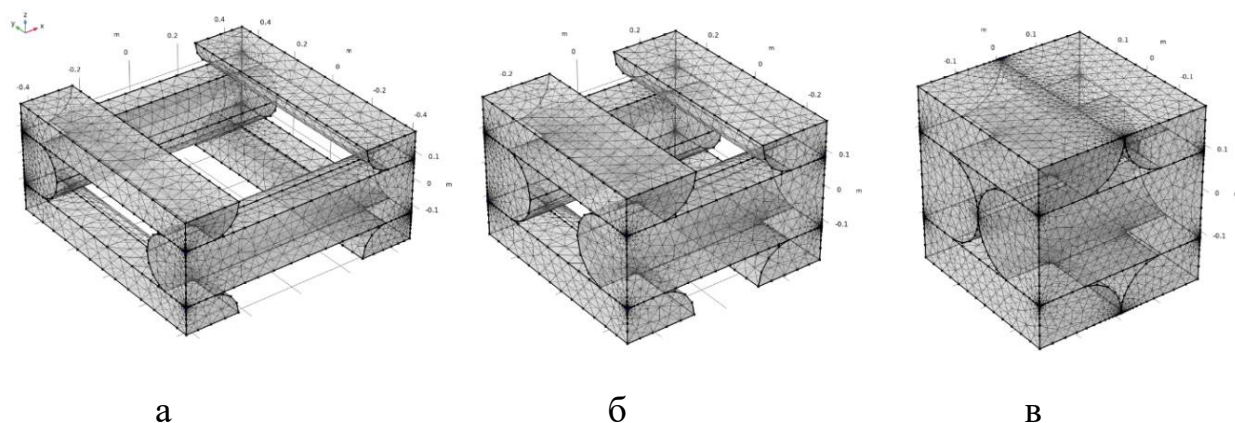


Рисунок 44 – Сетка, используемая для моделирования при различных значениях степени заполнения: а – 10%; б – 50%; 100%

Масса материала рассчитывается по формуле:

$$m = \rho_M * V, \quad (26)$$

где:  $\rho_M$  – плотность материала,  $V$  – степень заполнения. На рисунке 45 представлены результаты численного моделирования распределения механических напряжений при различных значениях степени заполнения.

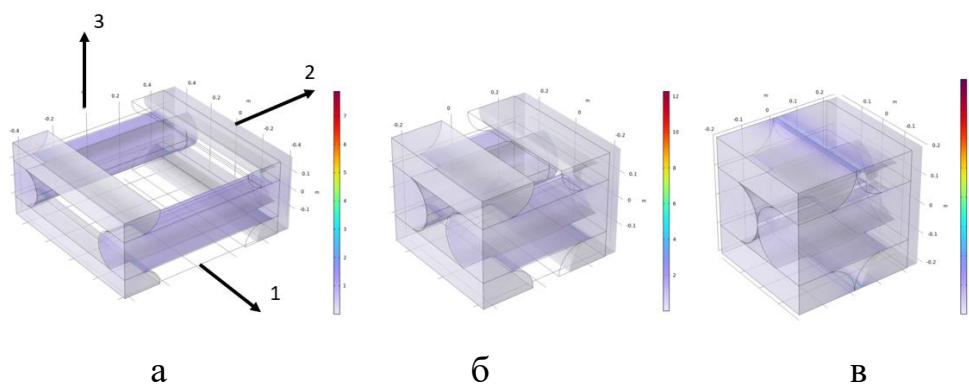


Рисунок 45 – Результаты численного моделирования распределения механических напряжений при различных значениях степени заполнения:

а – 10%; б – 50%; в – 100%

В виду принятой симметричной схемы ячейки периодичности свойства в направлениях 1 и 2 должны совпадать. Направление 1,2 - продольные направления (в направлении печати, в слое); 3 - поперечное между слоями.

Для определения оптимального перекрытия слоя было проведено моделирование при различных значениях перекрытия слоя  $\Delta h$  ( $\Delta h$  изменялось в диапазоне 0,05-0,15). В результате численного решения были получены эффективные значения модуля упругости, модуля сдвига, коэффициента Пуассона ортотропного материала в зависимости от степени заполнения. Эффективный модуль упругости для ортотропного материала в зависимости от степени заполнения при различных значениях перекрытия слоев представлены на рисунках 46, 47. Эффективный модуль сдвига для ортотропного материала в зависимости от степени заполнения при различных значениях перекрытия слоев представлены на рисунках 48, 49. Эффективный коэффициент Пуассона для ортотропного материала в зависимости от степени заполнения при различных значениях перекрытия слоев представлены на рисунках 50, 51.

Среднее значение модуля упругости составило 1400 МПа. Данное значение соответствует кривой, полученной для  $\Delta h=0,1$  мм (или 10%). Сопоставление результатов эксперимента с расчетами моделирования представлено на рисунке 52.

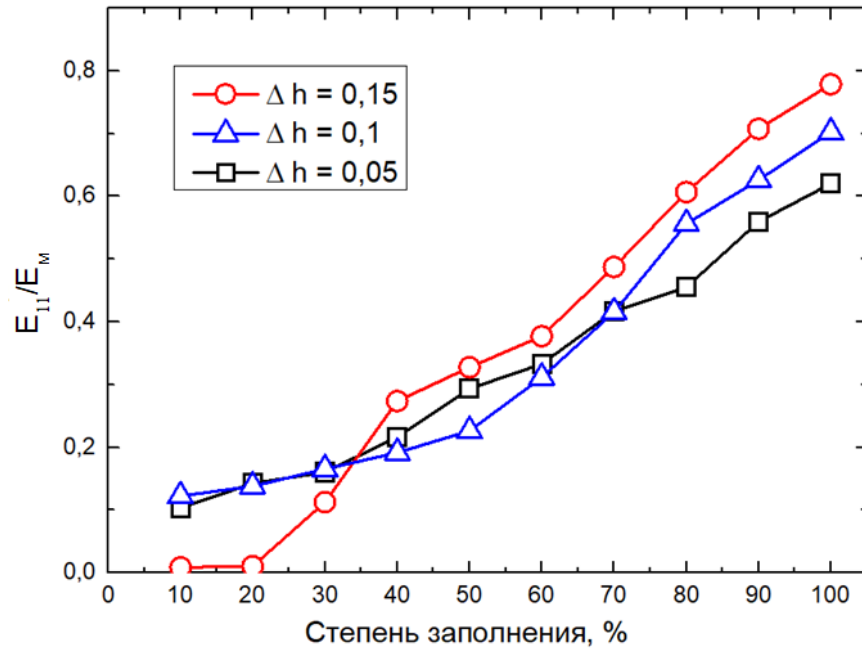


Рисунок 46 – Эффективный модуль упругости в продольном направлении ортотропного материала (в направлении 1 или в направлении перпендикулярном слою)

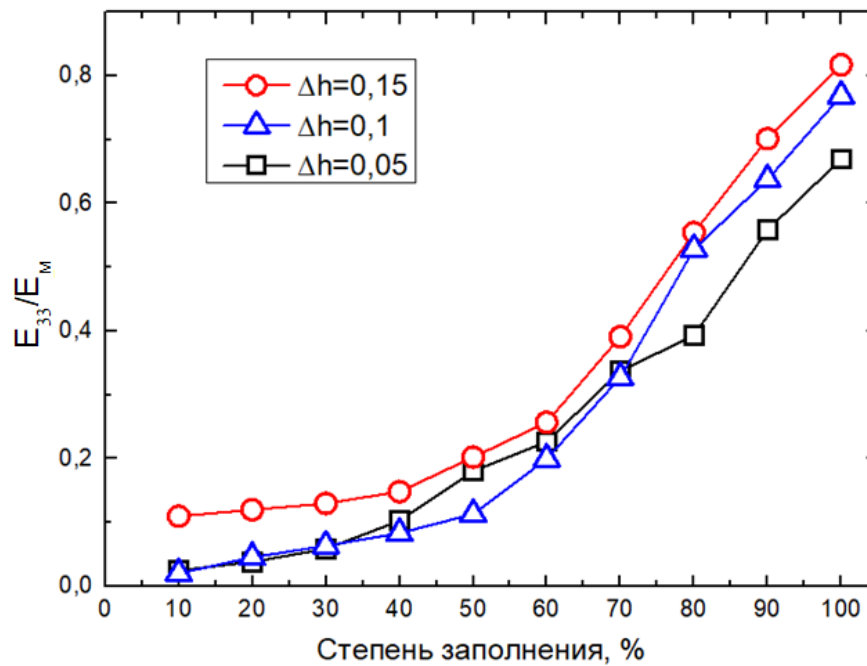


Рисунок 47 – Эффективный модуль упругости в поперечном направлении (в направлении 3 или в направлении перпендикулярном слою)

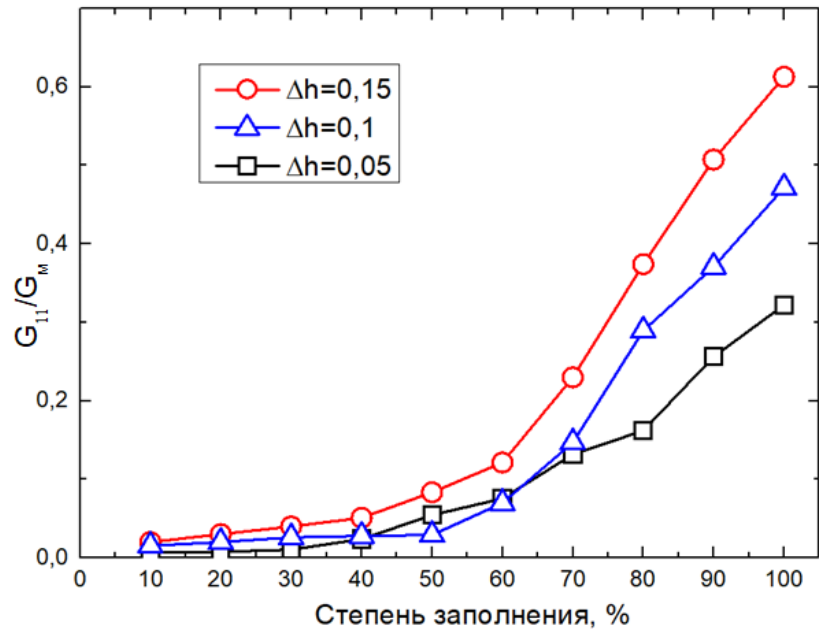


Рисунок 48 – Эффективный модуль сдвига в продольном направлении ортотропного материала (в направлении 1 или в направлении перпендикулярном слою)

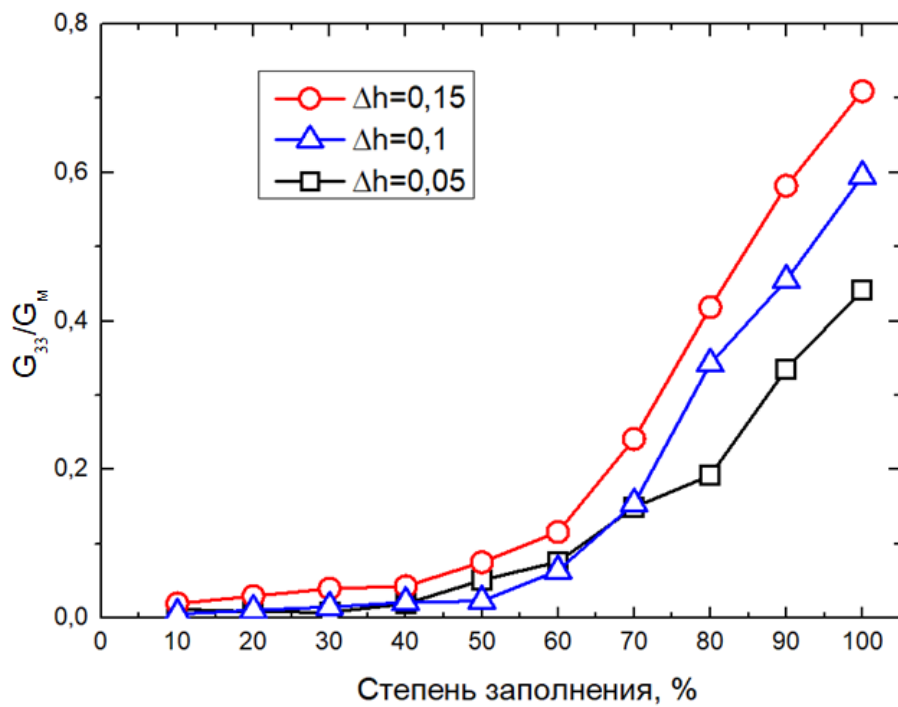


Рисунок 49 – Эффективный модуль сдвига в поперечном направлении (в направлении 3 или в направлении перпендикулярном слою)

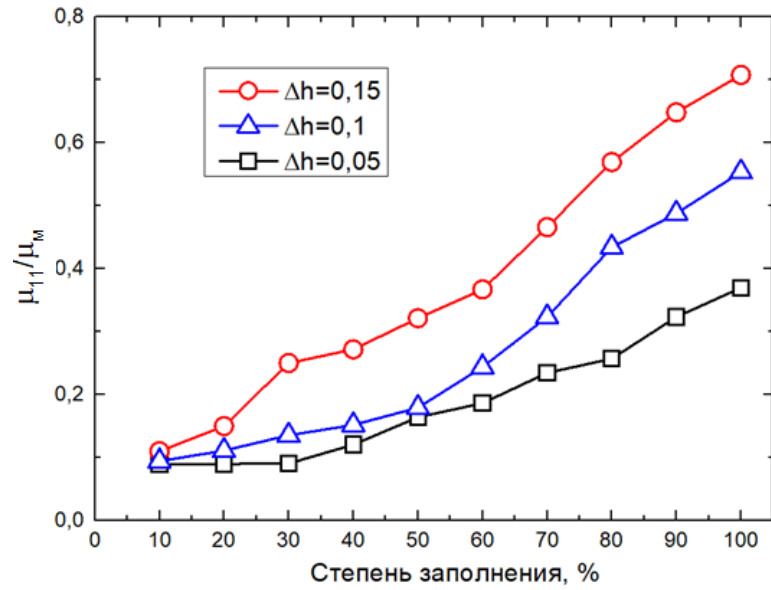


Рисунок 50 – Эффективный коэффициент Пуассона в продольном направлении ортотропного материала (в направлении 1 или в направлении перпендикулярном слою)

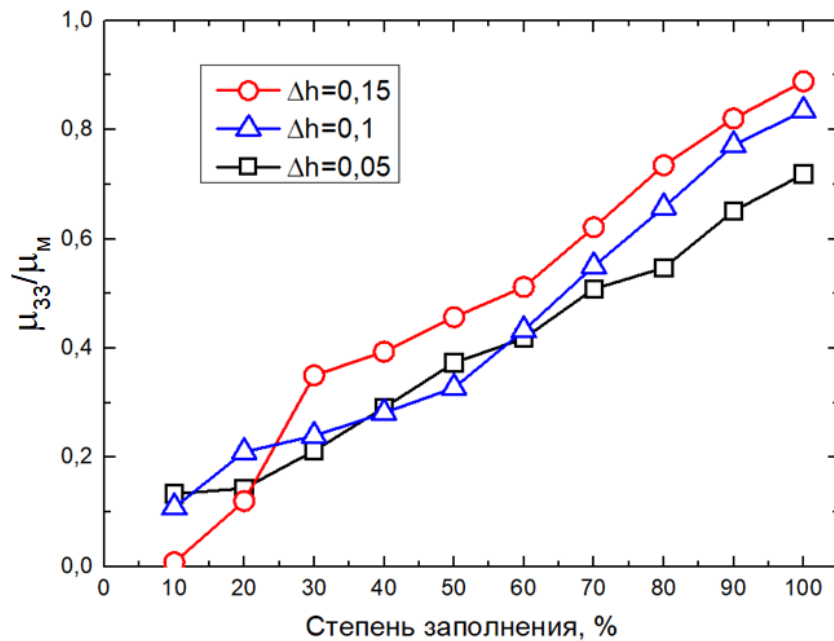


Рисунок 51 – Эффективный коэффициент Пуассона в поперечном направлении (в направлении 3 или в направлении перпендикулярном слою)

Для определения фактического значения перекрытия слоя и выбора расчетной кривой экспериментальным путем был определен модуль упругости 10 образцов, напечатанных из АБС пластика марки REC по рекомендуемым

производителем материала параметрам печати и при степени заполнения 100%. Образцы испытаны на универсальной испытательной машине РЭМ50А\_РЭ в соответствии с ГОСТ 11262-2017.

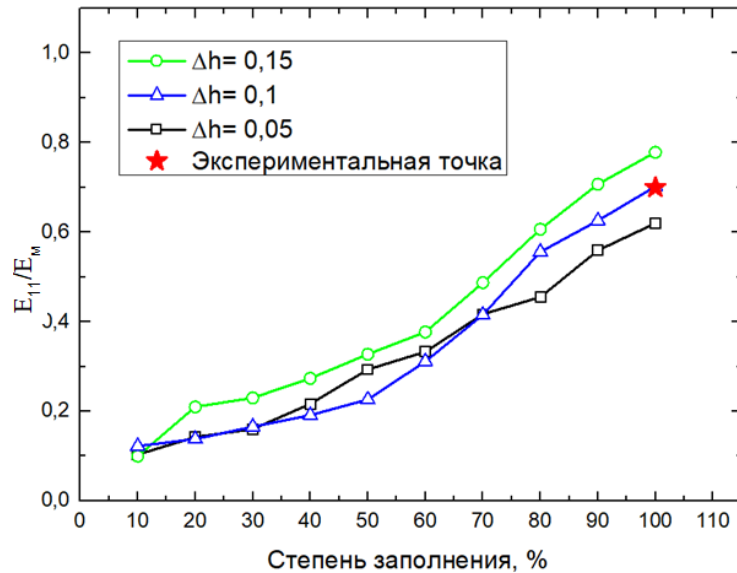


Рисунок 52 – Сопоставление результатов эксперимента с расчетами моделирования

В результате численного решения были получены эффективные характеристики ортотропного материала: модуль упругости, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, - в зависимости от степени заполнения. Результаты микромеханического моделирования представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты микромеханического моделирования

V, %	$E_{11}/E_M$	$E_{33}/E_M$	$G_{12}/G_M$	$G_{23}/G_M$	$\mu_{12}/\mu_M$	$\mu_{31}/\mu_M$	m, г
100	0,702044	0,768722	0,471737	0,595093	0,553144	0,834591	1000
90	0,625905	0,637577	0,370778	0,455044	0,487661	0,771704	900
80	0,556100	0,528425	0,289469	0,342551	0,433837	0,757899	800
70	0,415491	0,327588	0,146965	0,154245	0,322982	0,550159	700
60	0,311341	0,199680	0,069785	0,064258	0,243606	0,432745	600
50	0,226393	0,113234	0,029045	0,023390	0,179058	0,327438	500
40	0,191444	0,083339	0,028027	0,021680	0,151666	0,281412	400
30	0,165506	0,063767	0,026026	0,0152497	0,135273	0,239355	300
20	0,138177	0,045541	0,020122	0,011077	0,111029	0,209857	200
10	0,122373	0,020418	0,015342	0,005806	0,094099	0,108525	100



По полученным данным были построены графики зависимостей эффективных характеристик ортотропного материала от степени заполнения (рисунки 53-55).

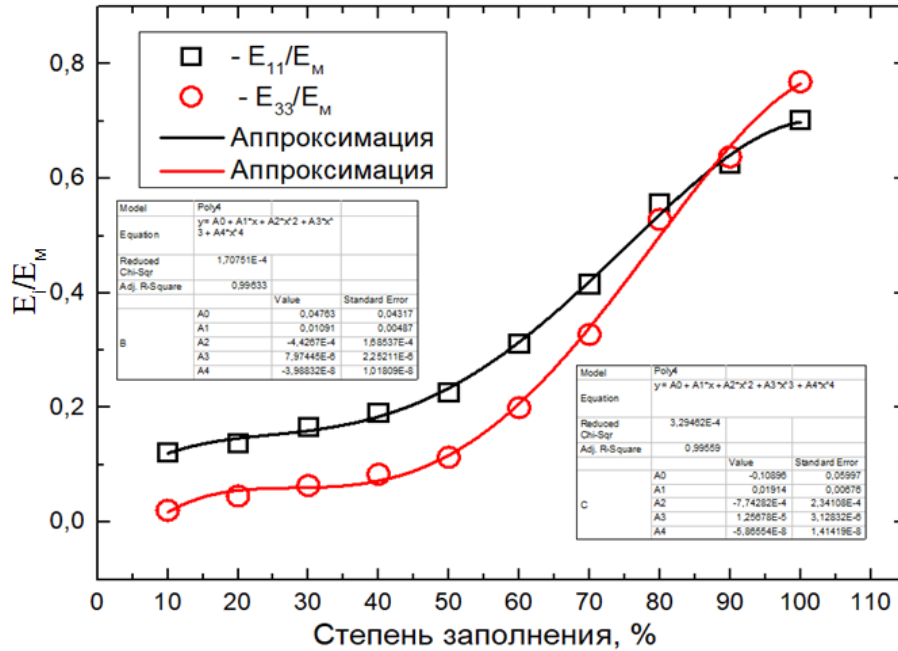


Рисунок 53 – Зависимости модуля упругости от степени заполнения ортотропного материала

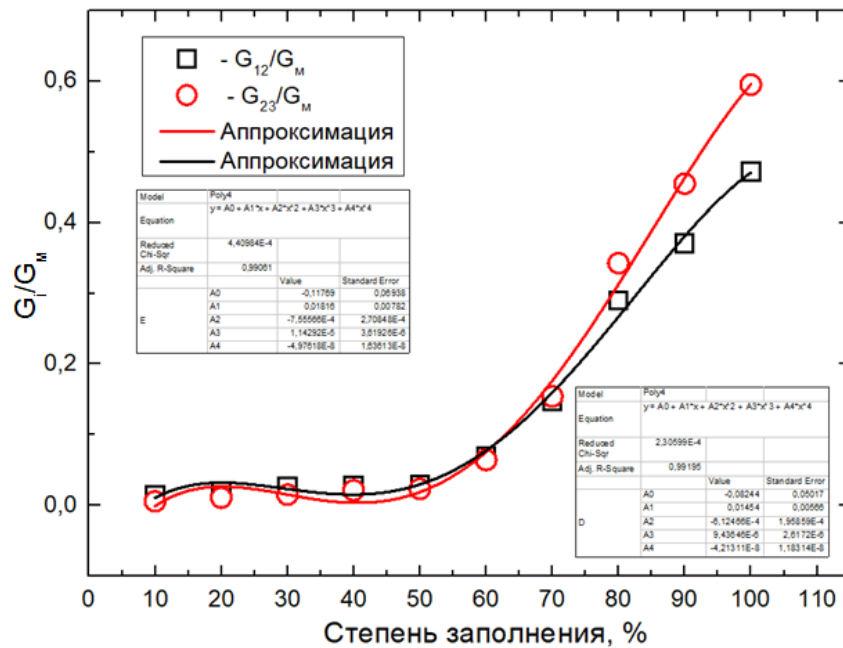


Рисунок 54 – Зависимости модуля сдвига ортотропного материала от степени заполнения

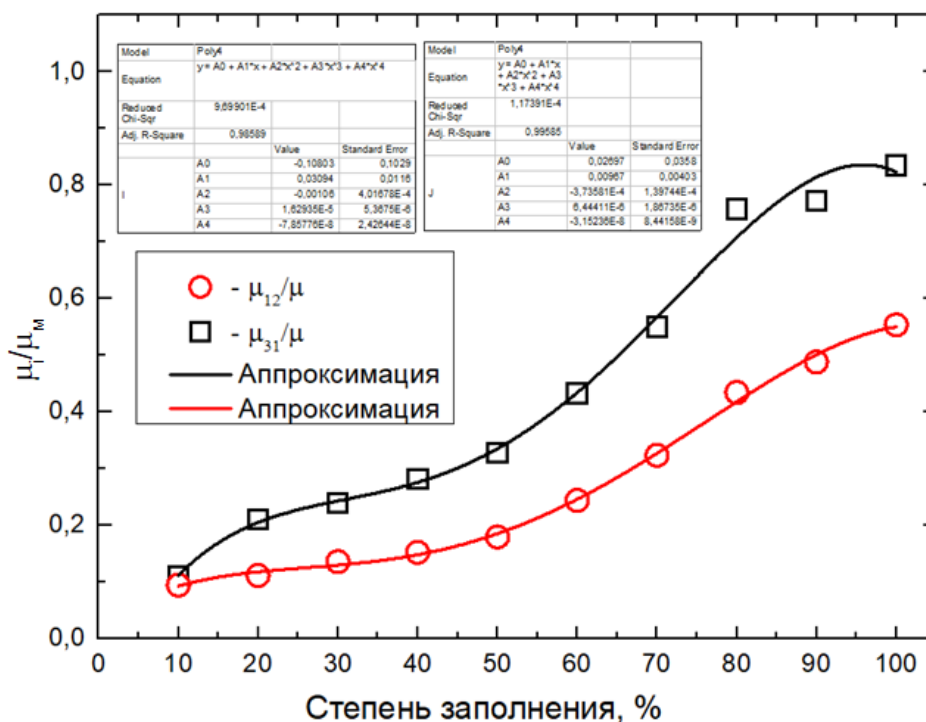


Рисунок 55 – Зависимости коэффициента Пуассона ортотропного материала от степени заполнения

На основании результатов моделирования были получены зависимости эффективных характеристик ортотропного материала от степени заполнения:

$$\frac{E_{11}}{E_M} = 0,04763 + 0,01091 * V - 0,00044267 * V^2 + 0,00000797445 * V^3 + 0,0000000398832 * V^4 \quad (27)$$

$$\frac{E_{33}}{E_M} = -0,10896 + 0,01914 * V - 0,000774282 * V^2 + 0,0000125678 * V^3 - 0,0000000586554 * V^4 \quad (28)$$

$$\frac{G_{12}}{G_M} = 0,08244 + 0,01454 * V - 0,000612466 * V^2 + 0,00000943646 * V^3 + 0,0000000421311 * V^4 \quad (29)$$

$$\frac{G_{23}}{G_M} = -0,11769 + 0,01816 * V - 0,000755566 * V^2 + 0,0000114292 * V^3 - 0,0000000497618 * V^4 \quad (30)$$

$$\frac{\mu_{21}}{\mu_M} = 0,02697 + 0,00967 * V - 0,000373581 * V^2 + 0,00000644411 * V^3 - 0,0000000315236 * V^4 \quad (31)$$

$$\frac{\mu_{31}}{\mu_M} = -0,10803 + 0,03094 * V - 0,00106 * V^2 + 0,0000162935 * V^3 - 0,0000000785776 * V^4 \quad (32)$$

где:  $E_M$  – модуль упругости материала;  $G_M$  – модуль сдвига материала;  $\mu_M$  – коэффициент Пуассона.

Для оценки точности разработанных моделей были проведены эксперименты на образцах из АБС пластика, напечатанных при параметрах, представленных в таблице 9. Схема заполнения представлена рисунке 56.

Таблица 9 – режимы печати образцов для проверки моделей

Температура печати, °С	250
Температура стола, °С	100
Высота слоя, мм	0,2
Угол наклона растра, °	0; 90
Скорость печати, мм/с	50
Заполнение, %	100/80/60/40/20

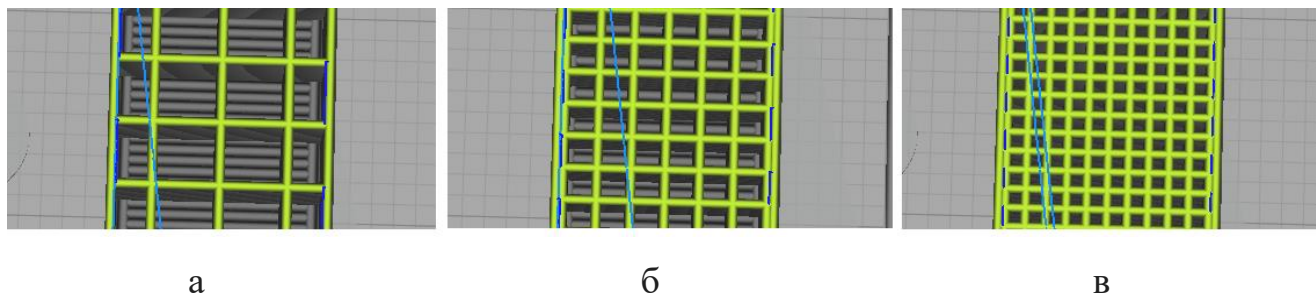


Рисунок 56 – Схема заполнения при проведении проверочных экспериментов:

а – 20%; б – 60%; в – 100%

В таблице 10 приведены результаты моделирования и экспериментальные данные.

Таблица 10 – Результаты микромеханического моделирования и экспериментальные данные

V, %	Ортотропная модель		Изотропная модель	Данные экспериментов	
	Е, МПа (0°)	Е, МПа (90°),	Е, МПа	Е, МПа (0°)	Е, МПа (90°)
100	1396	1528	1983	1419	1229
80	1073	988	1414	1028	935
60	628	412	925	650	395
40	368	143	515	399	152
20	292	111	184	315	122

Анализ данных, приведенных в таблице 10 показывает, что изотропная модель в сравнении с экспериментальными данными имеет погрешность 30% и может быть применима только для экспресс-оценки эффективных характеристик материала изделия при разной степени заполнения. Ортотропная модель имеет 7,16% погрешности, что является допустимым. Таким образом, ортотропная

модель может быть применима для расчетов эффективных характеристик материала изделия при разных значениях степени заполнения.

### **Выводы по главе 3**

1. Для реализации разработанной структуры конструкторского обоснования режимов FDM-печати были разработаны способы определения фактических значений характеристик изделия, базирующиеся на аналитических зависимостях эффективных характеристик материала от степени заполнения внутреннего объема.

2. Разработаны модели зависимости эффективных характеристик материала изделия от степени заполнения внутреннего объема для изотропного и ортотропного материала, позволяющие определить оптимальное заполнение и уменьшить массу изделий до 50% при достижении заданных характеристик.

3. Расчеты и проверочные эксперименты показали, что погрешность изотропной модели составляет 30%, поэтому данная модель может быть применима только для экспресс-оценки эффективных характеристик материала при различных значениях степени заполнения. Погрешность ортотропной модели составляет 7%, и она может использоваться для оценки эффективных характеристик при различных значениях степени заполнения. В дальнейшем данная модель будет использована для определения фактических значений характеристик изделия.

## **ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ FDM-ПЕЧАТИ ИЗДЕЛИЙ С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Выбор рациональных параметров печати позволяет обеспечить необходимые технические требования к изделию и свойствам материала. В традиционных технологиях обработки используются параметрические зависимости, связывающие характеристики изделия с параметрами процесса. Эти зависимости, как правило, построены на данных большого количества экспериментов [151-153].

Целью исследований, проведенных в главе 4, является определение рациональных режимов FDM-печати, позволяющих уменьшить материалоемкость изделия при выполнении заданных характеристик, путем проведения планируемого многофакторного эксперимента и уравнений регрессии физико-механических свойств от температуры и скорости печати, высоты слоя. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- провести эксперименты при различных параметрах FDM-печати;
- на основе результатов эксперимента построить регрессионные зависимости свойств изделия от параметров печати;
- проанализировать полученные зависимости и дать рекомендации для выбора параметров печати, обеспечивающих необходимые свойства изделия.

### **4.1 Планирование факторного эксперимента по влиянию параметров FDM-печати на физико-механические свойства**

На основании анализа и обобщения данных, полученных в ходе обзора современной научно-технической литературы, выполненного в первой главе, следует, что основное внимание исследователей фокусируется на нескольких основных параметрах процесса FDM-печати, которые влияют на свойства изделия.

### 4.1.1 Реализация факторного эксперимента

Механические свойства, точность изделия, а также стоимость изделия напрямую зависят от материала, из которого изготавливается изделие. Решение поставленных задач в работе было осуществлено при использовании АБС-пластика, как материала, наиболее распространенного для FDM-печати. Следует отметить, что при использовании другого материала алгоритм определения значений параметров процесса, обеспечивающих свойства изделия, не изменится, только к изменению диапазонов значений технологических параметров, внутри которых будут находиться оптимальные режимы печати, обеспечивающие максимальные (минимальные) значения требуемого свойства изделия.

Согласно рекомендациям, режимы FDM-печати могут варьироваться в довольно широких пределах. Например, скорость печати может задаваться в пределах 30 - 50 мм/с. Высокая скорость обеспечивает производительность процесса, а низкая скорость обеспечивает лучшую экструзию материала, что особенно важно при наполнении полимера специальными добавками, и высокие прочностные характеристики материала образца. Температура печати изменяется в широких пределах в зависимости от используемого при печати материала. При этом высокая температура обеспечивает лучшую текучесть, и, следовательно, получение более однородного материала с уменьшенной пористостью. Повышение температуры выше определённого значения приводит к деградации полимера и ухудшению свойств образца. Толщина наплавленного слоя тоже имеет неоднозначное влияние на характеристики процесса и свойства изделия. Уменьшение высоты печатаемого слоя повышает прочность образца, при этом существует такая толщина наплавленного слоя, после которой значительного увеличения прочности нет. При этом температура экструзии  $T$ , °С, скорость печати  $V$ , мм/сек и высота слоя  $h$ , мм будут иметь свои значения для каждого материала при 3D-печати для получения требуемых свойств изделия. Следует также отметить, что эти параметры обеспечивают получение определенной геометрии и формы изделия и определяют стоимость его изготовления. Время печати будет

уменьшаться по мере увеличения высоты слоя и скорости печати, а потребление энергии увеличиваться по мере увеличения температуры экструзии. Поэтому температура экструзии  $T$ , °С, скорость печати  $V$ , мм/сек и высота слоя  $h$ , мм были выбраны в качестве факторов, входящих в функцию, определяющую заданные свойства изделия. Для нахождения факторов процесса 3D-печати, определяющих заданное значение свойства изделия, можно воспользоваться методом множественных регрессий (регрессионный анализ).

Реализация алгоритма регрессионного анализа экспериментальных результатов, представленных в таблице, позволила найти уравнения регрессии в зависимости от принятых параметров печати для АБС пластика. Для определения более точной зависимости регрессионные модели были получены по двум методам:

- с использованием полного факторного эксперимента для трех факторов, состоящего из 27 экспериментов;
- с использованием трехуровневого плана Бох-Бехнкен для трех факторов, состоящего из 15 экспериментов.

С помощью программы Minitab и опции Response-Surface был построен план для 27 экспериментов, состоящий из трех факторов на трех уровнях. Значения переменных параметров FDM-печати для проведения эксперимента представлены в таблице 11. В результате была получена матрица эксперимента, состоящая из 27 экспериментов. Заполненная матрица для 27 экспериментов представлена в таблице 12.

Таблица 11 – Значения переменных параметров 3D-печати

Уровень	Высота слоя, $h$ , мм	Скорость печати, $V$ , мм/сек	Температура печати, $T$ , °С
1	0,1	30	225
2	0,2	40	250
3	0,3	50	275

Таблица 12 – Матрица полного факторного эксперимента

№ Образца	Скорость печати, V, мм/сек		Высота слоя, h, мм		Температура печати, T, °C	
	уровень	значение	уровень	значение	уровень	значение
1	1	30	1	0,1	1	225
2	1	30	1	0,1	2	250
3	1	30	1	0,1	3	275
4	1	30	2	0,2	1	225
5	1	30	2	0,2	2	250
6	1	30	2	0,2	3	275
7	1	30	3	0,3	1	225
8	1	30	3	0,3	2	250
9	1	30	3	0,3	3	275
10	2	40	1	0,1	1	225
11	2	40	1	0,1	2	250
12	2	40	1	0,1	3	275
13	2	40	2	0,2	1	225
14	2	40	2	0,2	2	250
15	2	40	2	0,2	3	275
16	2	40	3	0,3	1	225
17	2	40	3	0,3	2	250
18	2	40	3	0,3	3	275
19	3	50	1	0,1	1	225
20	3	50	1	0,1	2	250
21	3	50	1	0,1	3	275
22	3	50	2	0,2	1	225
23	3	50	2	0,2	2	250
24	3	50	2	0,2	3	275
25	3	50	3	0,3	1	225
26	3	50	3	0,3	2	250
27	3	50	3	0,3	3	275

План для 15 экспериментов был создан с помощью программы Minitab и опции Box-Behnken. Матрица эксперимента для 15 экспериментов представлена в таблице 13.

Таблица 13 – Матрица трехуровневого плана Box-Behnken

№ Образца	Температура печати, T, °C		Высота слоя, h, мм		Скорость печати, V, мм/сек	
	уровень	значение	уровень	значение	уровень	значение
1	1	225	1	0,1	2	40



№ Образца	Температура печати, T, °C		Высота слоя, h, мм		Скорость печати, V, мм/сек	
	уровень	значение	уровень	значение	уровень	значение
2	1	275	3	0,1	2	40
3	3	225	1	0,3	2	40
4	3	275	3	0,3	2	40
5	1	225	2	0,2	1	30
6	1	275	2	0,2	3	30
7	3	225	2	0,2	1	50
8	3	275	2	0,2	3	50
9	2	250	1	0,1	1	30
10	2	250	1	0,3	3	30
11	2	250	3	0,1	1	50
12	2	250	3	0,3	3	50
13	2	250	2	0,2	2	40
14	2	250	2	0,2	2	40
15	2	250	2	0,2	2	40

Построенный план печати образцов позволяет использовать полную и усеченную регрессионную модель, которая будет иметь следующий вид

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_{12}x_{12} + \dots b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + \dots \quad (33)$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_{12} + b_{13}x_{13} + b_{23}x_{23} + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (34)$$

где  $b$  – коэффициенты регрессии, показывающие среднюю величину изменения коэффициента качества при увеличении переменных параметров FDM-печати ( $V'$ ,  $T'$ ,  $h'$ ) на единицу измерения;  $b_0$  – свободная часть уравнения, которую также предстоит определить. Для нахождения коэффициентов регрессии каждый из параметров печати был исследован по трехуровневой шкале в соответствии с возможным диапазоном их изменения.

Реализация алгоритма регрессионного анализа позволяет найти уравнения регрессии для факторов качества в зависимости от параметров печати для принятого материала. Факторами качества изготавливаемого изделия принимаются его механические свойства (предел прочности на растяжение, модуль упругости), плотность, пористость, время печати. Влияние параметров печати на каждый фактор качества изделия исследуется независимо. Изготовление образцов для экспериментального получения значения фактора качества соответствовало плану

печати и стандартным требованиям. Тестовые образцы были изготовлены по форме лопаток в соответствии с ГОСТ 11262-2017.

Предпечатная подготовка заключалась в проектировании трехмерной модели образца с использованием САПР SolidWorks, сохранении геометрии в формате STL и разбиении на слои с помощью программного обеспечения UltimakerCura5.2.1, представлена на рисунке 57. Режимы печати представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Основные режимы печати

<b>Температура печати, °С</b>	225; 250; 275
<b>Высота слоя, мм</b>	0,1; 0,2; 0,3
<b>Угол наклона растра, °</b>	0; 90
<b>Скорость печати, мм/с</b>	30; 40; 50
<b>Заполнение, %</b>	100

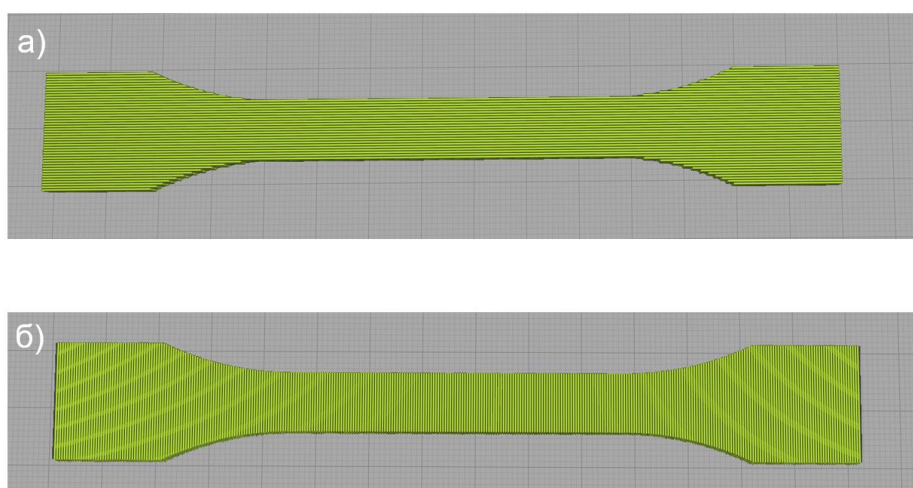


Рисунок 57 – Предпечатная подготовка модели в ПО Ultimaker Cura 5.2.1

Для всех сочетаний угла наклона, высоты слоя, скорости и температуры печати было напечатано по 5 образцов. На рисунке 58 представлен пример напечатанных образцов.



Рисунок 58 – Экспериментальные образцы, напечатанные при различных значениях угла наклона раstra: а-0°; б-90°

Исследования прочности на растяжение проводились на универсальной испытательной машине РЭМ50А\_РЭ в соответствии с ГОСТ 11262-2017 по стандартной методике. По результатам испытаний определялись предел прочности, модуль упругости.

Затем были проведены эксперименты по оценки величины остаточных деформаций образцов. При этом образцы нагружались до значений меньше предела прочности, а затем разгружались (рисунок 59). Как следует из полученных результатов, остаточные деформации отсутствуют, что свидетельствует о допустимости применения модели линейной упругости.

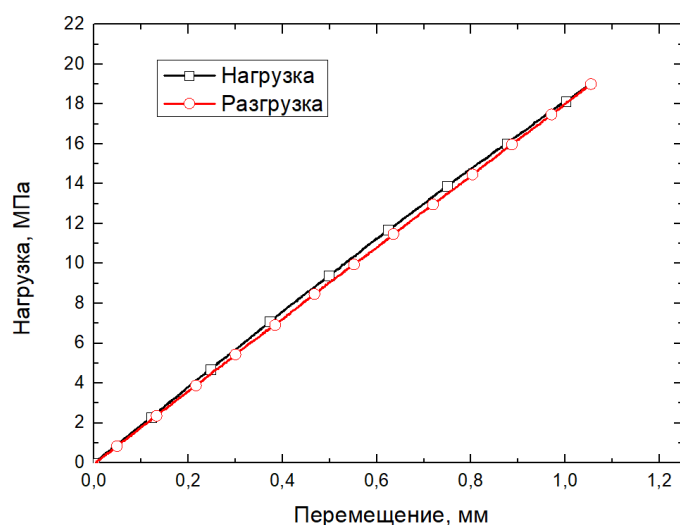


Рисунок 59 – Кривая «напряжения-перемещение» предела прочности на растяжения

Исследования пористости проводились на основании определения плотности образцов. Для измерения плотности использовались гидростатические весы SE224-С. Плотность образцов определялась путем погружения их в рабочую жидкость с известным значением плотности  $\rho_0$ . Сначала определялась масса образца  $A$  в воздушной среде, а затем – масса образца  $B$  в рабочей жидкости. Плотность  $\rho$  образца рассчитывалась по формуле:

$$\rho = \frac{A}{A-B} (\rho_0 - \rho_L) + \rho_L, \quad (35)$$

где  $\rho$  – плотность образца;  $A$  – масса образца в воздухе;  $B$  – масса образца в рабочей жидкости;  $\rho_0$  – плотность рабочей жидкости;  $\rho_L$  – плотность воздуха (0,0012г/см<sup>3</sup>).

Пористость  $P$  рассчитывалась по формуле:

$$P = \frac{\rho}{\rho_F} 100\%, \quad (36)$$

где  $\rho_F$  – плотность материала для печати, указанная в паспорте на материал;  $\rho$  – плотность напечатанных образцов, рассчитанная по формуле (35).

Для каждого образца на основе результатов экстензометра для определения модуля упругости по измерениям образца была получена кривая напряжения-деформации. Модуль упругости вычислялся непосредственно из наклона в линейной упругой области. Наибольшее значение напряжения представляло собой разрушающую нагрузку или напряжение при разрыве. Например, на рисунке 60 показана типичная кривая напряжения-деформации для образца с углом раstra 0°. Красной линией обозначен модуль упругости.

$$E = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1) l_0}{A_0 (\Delta \varepsilon_2 - \Delta \varepsilon_1)} \quad (37)$$

где  $\sigma_2$  - нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0.3% (0.25%), Н;  $\sigma_1$  - нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0.1% (0.05%), Н;  $l_0$  - расчетная длина образца, мм;  $A_0$  - площадь начального поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>;  $\Delta \varepsilon_2$  - удлинение, соответствующее нагрузке  $\sigma_2$ , мм;  $\Delta \varepsilon_1$  - удлинение, соответствующее нагрузке  $\sigma_1$ , мм.

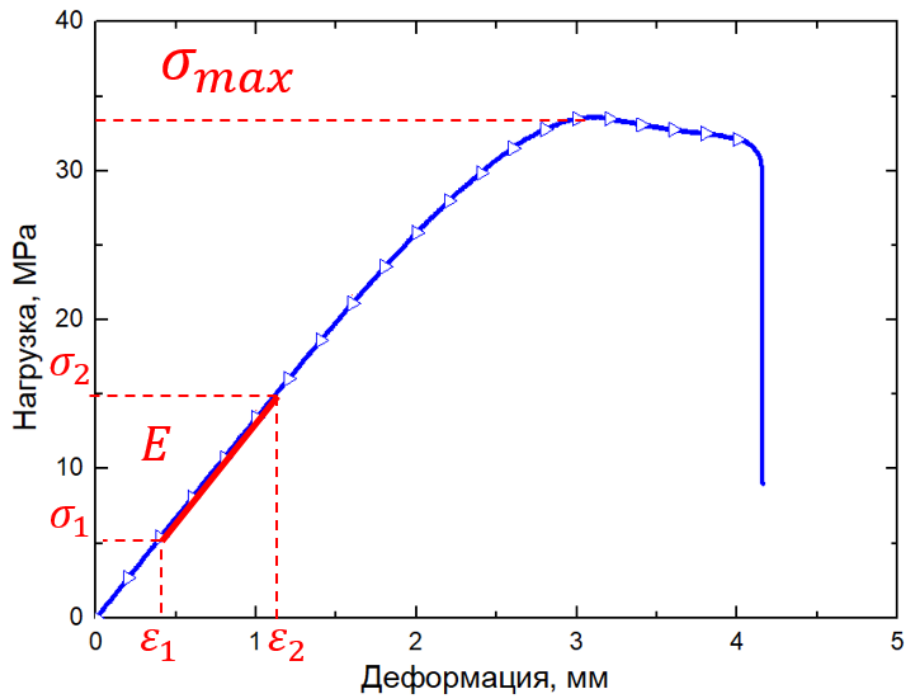


Рисунок 60 – Кривая «напряжения-деформации» для образца с углом раstra  $0^\circ$

Аналогичные расчеты были выполнены для всех образцов в соответствии с рекомендациями, изложенными в стандарте.

#### 4.1.2 Обработка полученных результатов факторного эксперимента

В результате проведения экспериментов были получены значения физико-механических свойств для различных параметров печати. В таблицах 15 и 16 представлены матрицы полнофакторного плана и трехуровневого плана Вох-Вейнкен соответственно.

Таблица 15 – Матрица полнофакторного эксперимента

№	$\sigma(0^\circ)$ , МПа	$\sigma(90^\circ)$ , МПа	$E(0^\circ)$ , МПа	$E(90^\circ)$ , МПа	$\rho(0^\circ)$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho(90^\circ)$ , г/см <sup>3</sup>	$P(0^\circ)$ , %	$P(90^\circ)$ , %	$t(0)$ , мин	$t(90)$ , мин
1	43,56	15,03	1474	1184	0,97	0,97	5,68	1,75	102	106
2	39,1	14,51	1433	1162	0,978	0,971	5,58	1,43	102	106
3	32,98	14,04	1421	1147	0,98	0,972	5,46	1,2	102	106
4	35,5	19,1	1465	1131	0,975	0,985	5,91	2,67	51	52
5	34,4	21,3	1445	1183	0,972	0,982	6,24	2,88	51	52
6	32,8	22,4	1453	1194	0,962	0,981	6,52	2,99	51	52
7	36,78	25	1461	1169	0,98	0,99	6,62	5,29	32	33
8	37,1	24,3	1477	1213	0,978	0,991	6,85	5,55	32	33

№	$\sigma(0^\circ)$ , МПа	$\sigma(90^\circ)$ , МПа	E (0°), МПа	E (90°), МПа	$\rho(0^\circ)$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho(90^\circ)$ , г/см <sup>3</sup>	P(0°),%	P(90°),%	t(0), мин	t(90), мин
9	38,35	24,19	1493	1326	0,975	0,986	7,07	5,81	32	33
10	44,5	26,5	1475	1288	1,022	1,026	2,59	2,38	79	83
11	43,6	22,1	1462	1262	1,026	1,035	2,24	1,94	79	83
12	42,5	19,7	1421	1198	1,027	1,036	2,05	1,63	79	83
13	34,45	26,4	1465	1210	1,01	1,013	4,1	3,51	39	41
14	32,78	22,2	1435	1174	1,009	1,012	4,24	3,63	39	41
15	30,95	20,9	1415	1166	1,008	1,011	4,59	3,92	39	41
16	34,75	27,2	1442	1298	1,005	1,015	4,21	3,61	25	26
17	33,6	25,2	1420	1301	1,005	1,012	4,26	3,82	25	26
18	33,15	24,4	1359	1312	1,004	1,011	4,29	3,93	25	26
19	50	34	1476	1328	1,03	1,029	1,81	1,75	65	69
20	45	45	1605	1334	1,032	1,031	1,65	1,43	65	69
21	47	36	1329	1229	1,034	1,037	1,51	1,2	65	69
22	33,4	27,2	1412	1211	1,024	1,013	2,13	2,67	32	34
23	29,6	21,4	1381	1134	1,025	1,011	2,25	2,88	32	34
24	29,2	19,3	1377	1123	1,027	1,012	2,37	2,99	32	34
25	29,1	24,83	1390	1293	1,021	0,994	2,76	5,29	21	22
26	45	45	1351	1280	1,02	0,992	2,85	5,55	21	22
27	27,96	23,9	1226	1254	1,019	0,988	2,94	5,81	21	22

Таблица 16 – Матрица трехуровневого плана Вох-Вейнкен

№	$\sigma(0^\circ)$ , МПа	$\sigma(90^\circ)$ , МПа	t(0), мин	t(90), мин	$\rho(0^\circ)$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho(90^\circ)$ , г/см <sup>3</sup>	P(0°),%	P(90°),%	E (0°), МПа	E (90°), МПа
1	44,5	26,5	79	83	1,022	1,026	2,59	2,38	1475	1288
2	42,5	19,7	79	83	1,027	1,036	2,05	1,63	1421	1198
3	34,75	27,2	25	26	1,005	1,015	4,21	3,61	1442	1298
4	33,15	24,4	25	26	1,004	1,011	4,29	3,93	1359	1312
5	35,5	35,5	51	51	0,975	0,975	5,91	5,91	1465	1465
6	19,1	19,1	52	52	0,985	0,985	2,67	2,67	1131	1131
7	33,4	33,4	32	32	1,024	1,024	2,13	2,13	1412	1412
8	27,2	27,2	34	34	1,013	1,013	2,67	2,67	1211	1211
9	39,1	39,1	102	102	0,978	0,978	5,58	5,58	1433	1433
10	14,51	14,51	106	106	0,971	0,971	1,43	1,43	1162	1162
11	45	45	65	65	1,032	1,032	1,65	1,65	1605	1605
12	32	32	69	69	1,031	1,031	1,43	1,43	1334	1334
13	32,78	22,2	39	41	1,009	1,012	4,24	3,63	1435	1174
14	32,78	22,2	39	41	1,009	1,012	4,24	3,63	1435	1174
15	32,78	22,2	39	41	1,009	1,012	4,24	3,63	1435	1174

По результатам экспериментов, проведенных для двух планов, были получены регрессионные зависимости физико-механических свойств от параметров FDM-печати.

$$\begin{aligned}
\sigma 0^{\circ}_{(27)} = & -144 + 4,79 * V - 515 * h + 2,32 * T + 0,0727 * V^2 \\
& - 285 * h^2 - 0,00699 * T^2 + 3,79 * V * h - 0,0621 \\
& * V * T + 2,94 * h * T + 0,0164 * V^2 * h \\
& - 0,000319 * V^2 * T + 20,42 * V * h^2 - 0,0696 * V \\
& * h * T + 0,000203 * V * T^2 + 0,21 * h^2 * T \\
& + 0,00023 h * T^2
\end{aligned} \tag{38}$$

$$\begin{aligned}
\sigma 0^{\circ}_{(15)} = & 88,0 - 0,485 * T - 125,4 * h + 1,571 * V + 0,000976 * T^2 \\
& + 533,5 * h^2 - 0,00690 * V^2 + 0,040 * T * h - 0,00160 \\
& * T * V - 3,625 * h * V
\end{aligned} \tag{39}$$

$$\begin{aligned}
\sigma 90^{\circ}_{(27)} = & -1709 + 26,7 * V + 424 * h + 4,52 * T - 0,1334 * V^2 \\
& - 1818 * h^2 - 0,00760 * T^2 - 3,8 * V * h - 0,1593 \\
& * V * T + 0,73 * h * T - 0,0763 * V^2 * h \\
& + 0,000596 * V^2 * T + 45,55 * V * h^2 - 0,0506 * V \\
& * h * T + 0,000233 * V * T^2 + 0,96 * h^2 * T \\
& + 0,0014 h * T^2
\end{aligned} \tag{40}$$

$$\begin{aligned}
\sigma 90^{\circ}_{(15)} = & -75 + 0,098 * T + 5 * h + 3,32 * V + 0,00040 * T^2 \\
& + 200 * h^2 - 0,0045 * V^2 + 0,1 * T * h - 0,01120 * T \\
& * V - 4,40 * h * V
\end{aligned} \tag{41}$$

$$\begin{aligned}
E 0^{\circ}_{(27)} = & -1993 + 38,2 * V + 1301 * h + 22,4 * T - 0,047 * V^2 \\
& + 294 * h^2 - 0,0382 * T^2 - 42,7 * V * h - 0,1157 * V \\
& * T + 0,17 * h * T
\end{aligned} \tag{42}$$

$$\begin{aligned}
E 0^{\circ}_{(15)} = & -1383 + 20,8 * T + 2744 * h + 6 * V - 0,0404 * T^2 \\
& + 1450 * h^2 + 0,17 * V^2 - 2,9 * T * h - 0,023 * V * T \\
& - 74,5 * h * V
\end{aligned} \tag{43}$$

$$\begin{aligned}
E 90^{\circ}_{(27)} = & 170 + 67,4 * V - 4937 * h + 1,1 * T - 0,235 * V^2 \\
& + 9033 * h^2 - 0,0067 * T^2 - 14,9 * V * h - 0,1697 * V \\
& * T + 8,6 * h * T
\end{aligned} \tag{44}$$

$$\begin{aligned}
 E90^\circ_{(15)} = & 898 - 3,5 * T - 5049 * h + 60,5 * V + 0,014 * T^2 \\
 & + 9125 * h^2 - 0,18 * V^2 + 10,4 * T * h - 0,151 * V \\
 & * T - 26,3 * h * V
 \end{aligned} \tag{45}$$

$$\rho 0^\circ_{(27)} = 0,9125 + 0,002567 * V - 0,0511 * h - 0,000002 * T \tag{46}$$

$$\begin{aligned}
 \rho 0^\circ_{(15)} = & 0,881 - 0,00075 * T - 0,005 * h + 0,00902 * V \\
 & + 0,525 * h^2 - 0,004700 * V^2 - 0,0014 * T * h \\
 & + 0,000003 * T * V + 0,00525 * h * V
 \end{aligned} \tag{47}$$

$$\rho 90^\circ_{(27)} = 0,9567 + 0,00155 * V - 0,0711 * h - 0,000002 * T \tag{48}$$

$$\begin{aligned}
 \rho 90^\circ_{(15)} = & 61,019 - 0,41244 * T - 19,799 * h - 0,3753 * V \\
 & + 0,000825 * T^2 + 49,425 * h^2 - 0,000122 * V^2 \\
 & - 0,0014 * T * h + 0,000003 * T * V + 0,00525 * h * V
 \end{aligned} \tag{49}$$

$$\begin{aligned}
 t 0^\circ_{(27)} = & 369,4 - 7,92 * V - 1703,3 * h + 0,05833 * V^2 \\
 & + 2333,3 * h^2 + 28,5 * V * h - 0,15 * V^2 * h - 25 \\
 & * V * h^2
 \end{aligned} \tag{50}$$

$$\begin{aligned}
 t 0^\circ_{(15)} = & 262 + 0,2 * T - 1067 * h - 4,58 * V + 0,0004 * T^2 \\
 & + 1325 * h^2 + 0,0275 * V^2 + 6,5 * h * V
 \end{aligned} \tag{51}$$

$$\begin{aligned}
 t 90^\circ_{(27)} = & 380,9 - 7,93 * V - 1832 * h + 0,0567 * V^2 \\
 & + 2617 * h^2 + 30,5 * V * h - 0,15 * V^2 * h - 30 \\
 & * V * h^2
 \end{aligned} \tag{52}$$

$$\begin{aligned}
 t 0^\circ_{(15)} = & 240 + 0,4 * T - 1112 * h - 4,35 * V + 0,0008 * T^2 \\
 & + 1400 * h^2 + 0,025 * V^2 + 6,5 * h * V
 \end{aligned} \tag{53}$$

$$\begin{aligned}
 P 0^\circ_{(27)} = & 20,2 - 0,626 * V + 7,4 * h - 0,013 * T + 0,00614 \\
 & * -34,9 * h^2 + 0,000026 * T^2 - 0,020 * V * h \\
 & - 0,00024 * V * T + 0,059 * h * T
 \end{aligned} \tag{54}$$



$$\begin{aligned}
 P0^{\circ}_{(15)} = & -32,8 + 0,386 * T + 12,2 * h - 0,478 * V \\
 & + 0,000764 * T^2 + 47,8 * h^2 - 0,0047 * V^2 \\
 & + 0,062 * T * h + 0,00037 * T * V + 0,017 * h * V
 \end{aligned} \tag{55}$$

$$P90^{\circ}_{(27)} = 4,945 - 10,1 * h - 0,0202 * T + 0,107 * h * T \tag{56}$$

$$\begin{aligned}
 P90^{\circ}_{(15)} = & -33,5 + 0,512 * T - 48,6 * h - 1,056 * V \\
 & + 0,001048 * T^2 - 8,8 * h^2 + 0,01018 * V^2 \\
 & + 0,1070 * T * h - 0,000190 * T * V + 0,89 * h * V
 \end{aligned} \tag{57}$$

Средние значения физико-механических свойств, полученные по регрессионным зависимостям (38) – (57) для полнофакторного и трехуровневого эксперимента Вох-Вейнке, представлены в таблицах 17 и 18 соответственно.

Таблица 17 – Физико-механические свойства образцов, полученные в результате полнофакторного эксперимента

№	$\sigma(0^{\circ})$ , МПа	$\sigma(90^{\circ})$ , МПа	E (0°), МПа	E (90°), МПа	$\rho(0^{\circ})$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho(90^{\circ})$ , г/см <sup>3</sup>	P(0°),%	P(90°),%	t(0), мин	t(90), мин
1	43,22	14,6	1444	1167	0,98395	0,99564	5,37	1,8	101	106
2	39,23	14,23	1464	1168	0,9839	0,99559	5,32	1,56	101,8	106
3	34,15	13,26	1436	1178	0,98385	0,99554	5,31	1,32	101,8	106
4	36,14	21,03	1459	1093	0,97884	0,98853	6,33	3,2	50,969	52,31
5	34,72	21,07	1479	1116	0,97879	0,98848	6,43	3,23	50,969	52,31
6	32,23	20,69	1452	1147	0,97874	0,98843	6,56	3,26	50,969	52,31
7	36,57	22,75	1479	1199	0,97373	0,98142	6,59	4,59	31,804	32,96
8	37,81	23,67	1500	1244	0,97368	0,98137	6,84	4,89	31,804	32,96
9	38,01	24,37	1473	1296	0,97363	0,98132	7,12	5,19	31,804	32,96
10	46,13	25,65	1490	1279	1,00962	1,01114	2,85	1,8	78,931	83,39
11	43,40	22,29	1481	1238	1,00957	1,01109	2,74	1,56	78,931	83,39
12	42,12	21,24	1425	1206	1,00952	1,01104	2,66	1,32	78,931	83,39
13	34,46	25,22	1462	1191	1,00451	1,00403	3,79	3,2	38,6	40,7
14	32,56	21	1454	1171	1,00446	1,00398	3,83	3,23	38,6	40,7
15	32,12	19,28	1397	1160	1,00441	1,00393	3,9	3,26	38,6	40,7
16	34,37	29,18	1440	1282	0,9994	0,99692	4,03	4,59	24,935	26,35
17	33,39	24,59	1432	1284	0,99935	0,99687	4,22	4,89	24,935	26,35
18	33,91	22,67	1376	1295	0,9993	0,99682	4,44	5,19	24,935	26,35
19	49,55	35,32	1527	1345	1,03529	1,02664	1,55	1,8	64,728	69,12
20	46,49	31,94	1489	1262	1,03524	1,02659	1,39	1,56	64,728	69,12
21	47,41	33,8	1403	1186	1,03519	1,02654	1,25	1,32	64,728	69,12
22	33,62	26,5	1456	1241	1,03018	1,01953	2,48	3,2	31,897	34,43
23	29,64	21	1419	1179	1,03013	1,01948	2,45	3,23	31,897	34,43
24	29,66	20,9	1334	1126	1,03008	1,01943	2,47	3,26	31,897	34,43
25	33,34	31,18	1391	1318	1,02507	1,01242	2,7	4,59	20,732	22,08

№	$\sigma(0^\circ)$ , МПа	$\sigma(90^\circ)$ , МПа	E (0°), МПа	E (90°), МПа	$\rho(0^\circ)$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho(90^\circ)$ , г/см <sup>3</sup>	P(0°),%	P(90°),%	t(0), мин	t(90), мин
26	28,55	24,05	1354	1278	1,02502	1,01237	2,82	4,89	20,732	22,08
27	27,79	22,5	1270	1246	1,02497	1,01232	2,98	5,19	20,732	22,08

Таблица 18 – Физико-механические свойства, полученные в результате трехуровневого эксперимента Vox-Behnken

№	$\sigma(0^\circ)$ , МПа	$\sigma(90^\circ)$ , МПа	t(0), мин	t(90), мин	$\rho(0^\circ)$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho(90^\circ)$ , г/см <sup>3</sup>	P(0°),%	P(90°),%	E (0°), МПа	E (90°), МПа
1	44,88	26	80,1	80,1	84,3	1,0011	2,5115	2,0025	1482,4	1307,4
2	42,03	20,5	80,1	80,1	84,3	0,9926	2,2815	1,5575	1451,9	1232,4
3	35,28	25,8	24,7	24,7	25,9	0,9911	3,7815	3,5135	1420,7	1285,2
4	32,83	24,3	24,7	24,7	25,9	0,9766	4,1715	4,1385	1361,2	1314,2
5	34,715	17,85	52,7	52,7	54,1	0,95605	5,981	4,9275	1458,8	1118,4
6	32,865	19,95	52,7	52,7	54,1	0,93655	6,246	5,1125	1425,3	1170,9
7	33,395	29,05	31,1	31,1	33,1	1,00125	2,208	2,8005	1449,3	1255,7
8	29,945	19,95	31,1	31,1	33,1	0,99775	2,103	2,7955	1392,8	1157,2
9	39,59	15,35	100,4	100,4	104,3	0,95505	5,306	5,454	1445,4	1185,95
10	37,44	25,95	32	32	32,9	0,94805	6,92	5,72	1518,2	1268,35
11	44,72	29,75	65,8	65,8	70,3	1,01425	1,382	1,452	1573,4	1300,35
12	28,07	22,75	23,4	23,4	24,9	0,99525	2,928	5,278	1348,2	1277,55
13	32,81	21,9	39,4	39,4	41,6	0,9851	4,142	3,546	1439,8	1184,8
14	32,81	21,9	39,4	39,4	41,6	0,9851	4,142	3,546	1439,8	1184,8
15	32,81	21,9	39,4	39,4	41,6	0,9851	4,142	3,546	1439,8	1184,8

Обозначения переменных в таблицах 15, 16, 17, 18 и зависимостях (38)-(57):  $\sigma$  – прочность при растяжении, МПа; E – модуль упругости, МПа;  $\rho$  – плотность, г/см<sup>3</sup>; t – время печати; P – пористость,%; 15 – регрессионная модель трехуровневого эксперимента Vox-Behnken; 0° – напечатанные образцы с углом наклона раstra 0°; 90° – напечатанные образцы с углом наклона раstra 90°; 27 – регрессионная модель полного факторного эксперимента.

На рисунках 61 – 70 приведены параметрические поверхности, построенные по разработанным регрессионным зависимостям для различных параметров процесса FDM-печати для образцов, напечатанных с углом наклона раstra 0° и 90°.

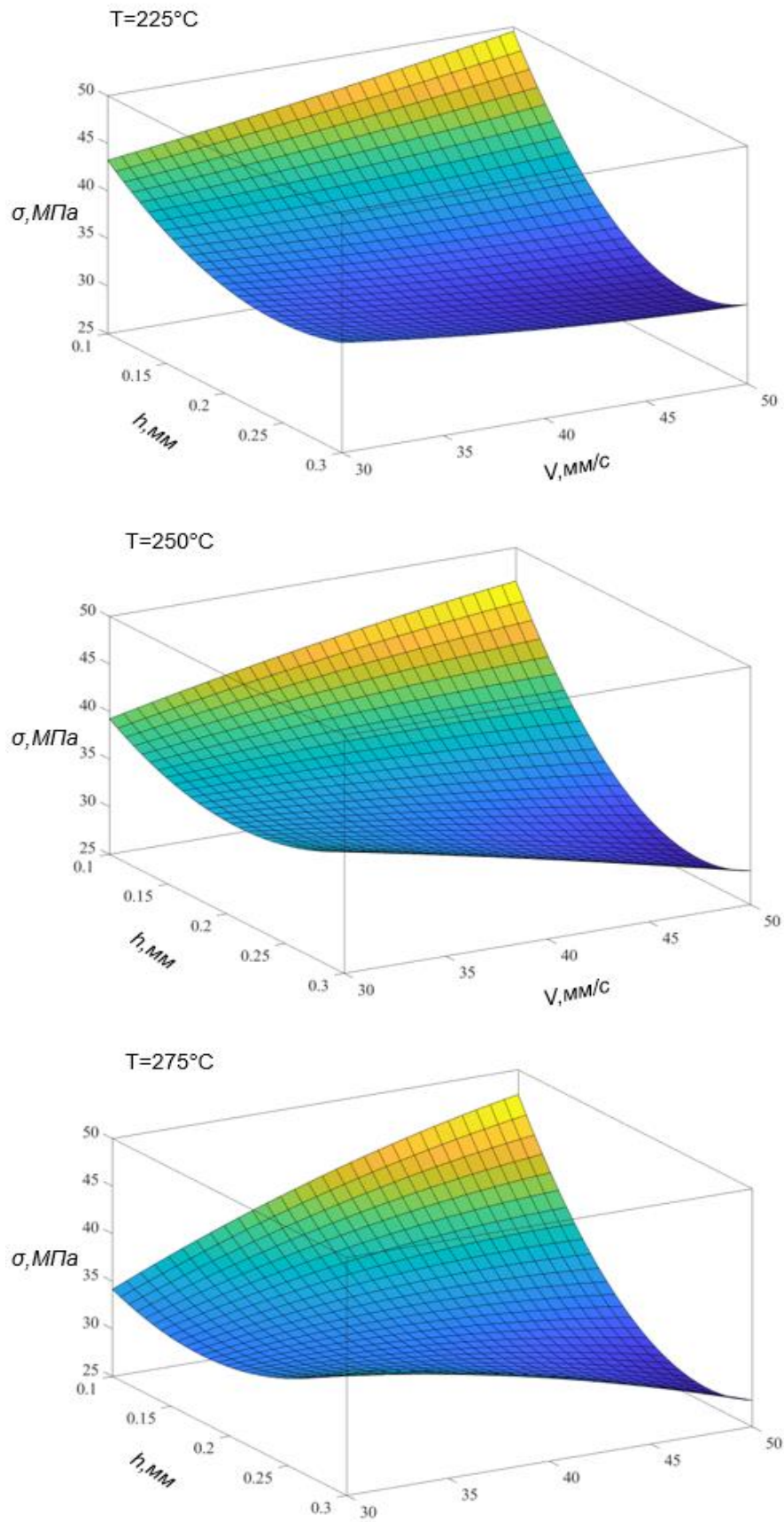


Рисунок б1 – Параметрические поверхности прочности образцов, напечатанных с углом наклона раstra  $0^{\circ}$

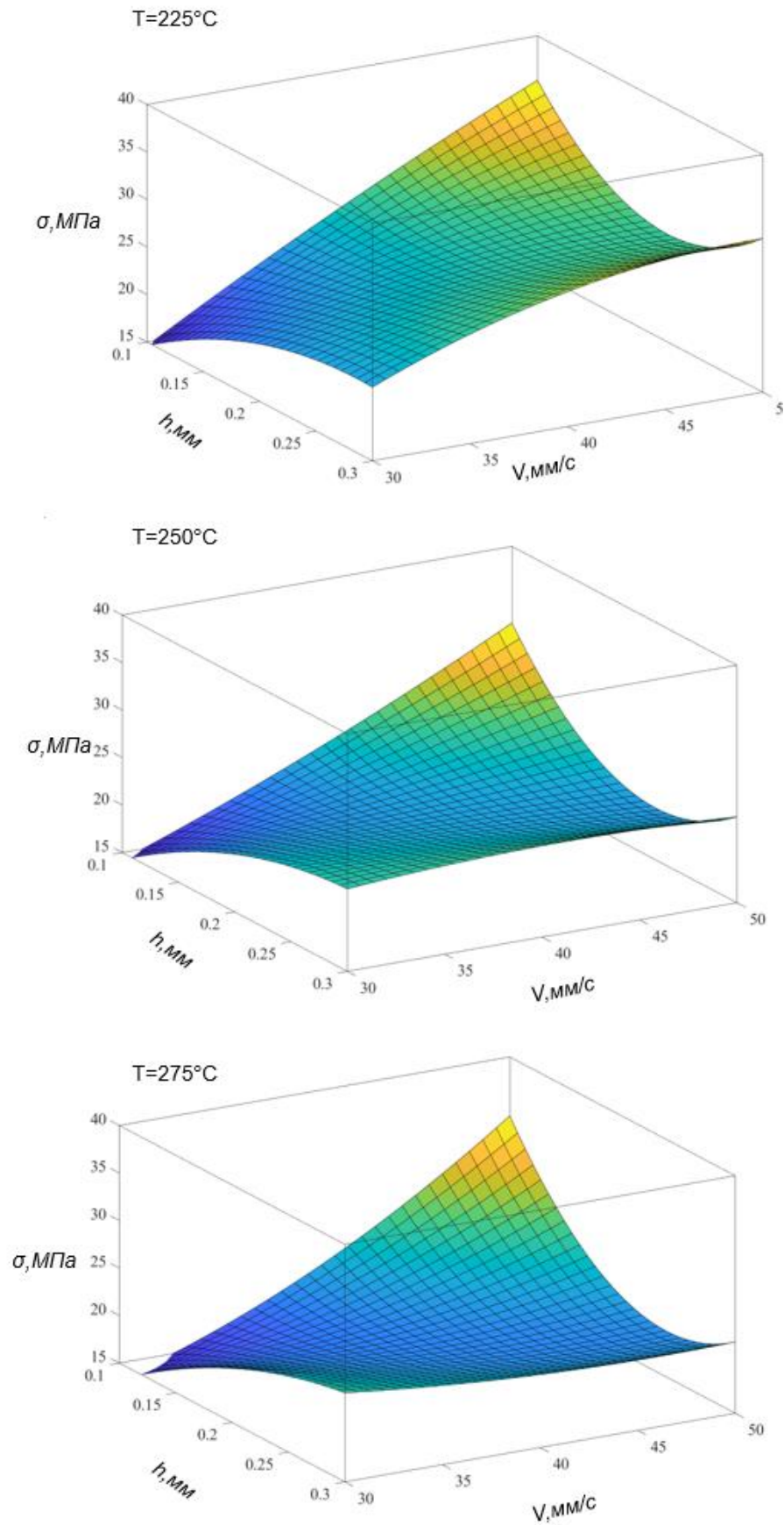


Рисунок 62 – Параметрические поверхности прочности образцов, напечатанных с углом наклона раstra  $90^{\circ}$

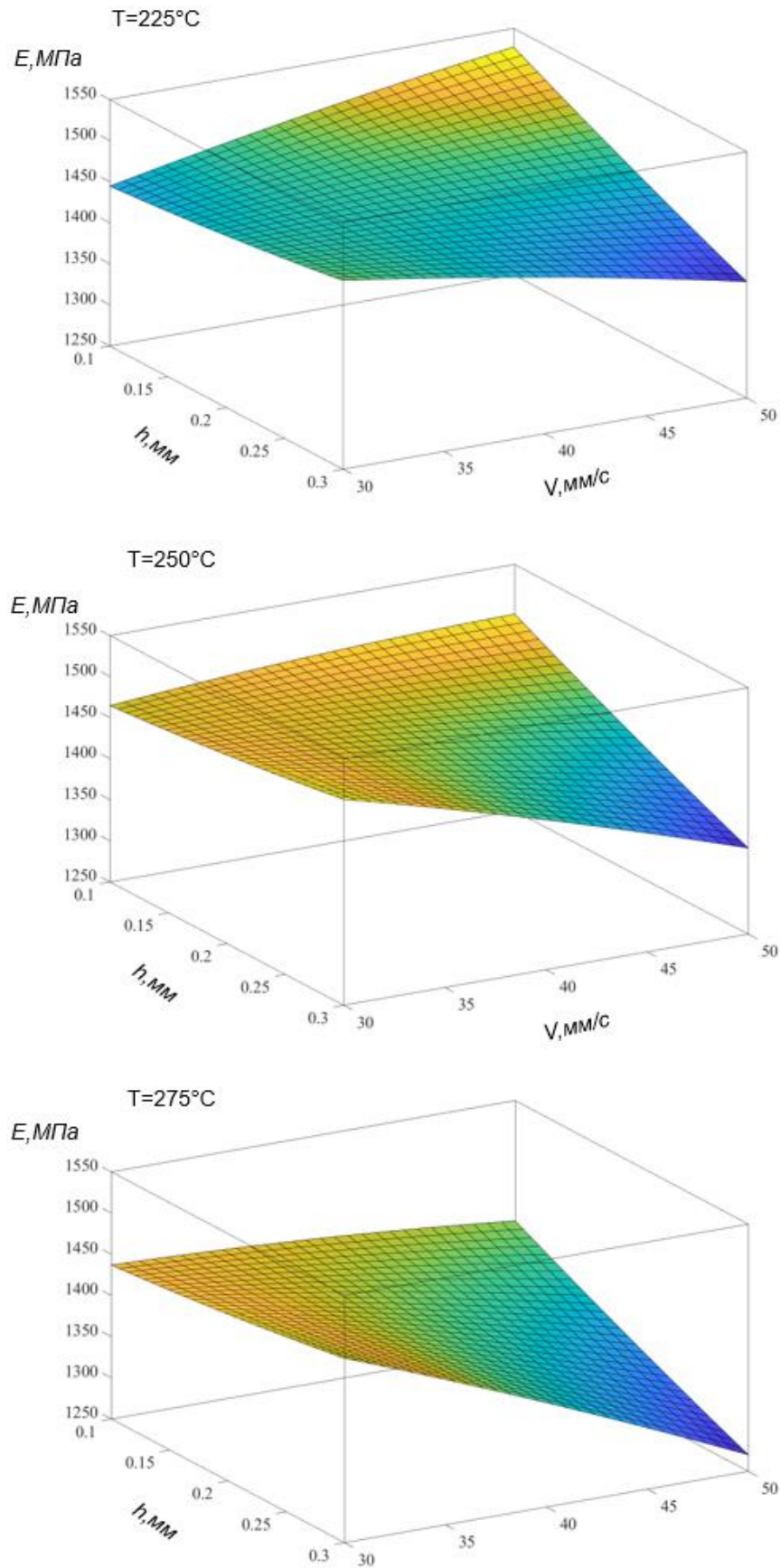


Рисунок 63 – Параметрические поверхности модуля упругости образцов, напечатанных с углом наклона раstra  $0^{\circ}$

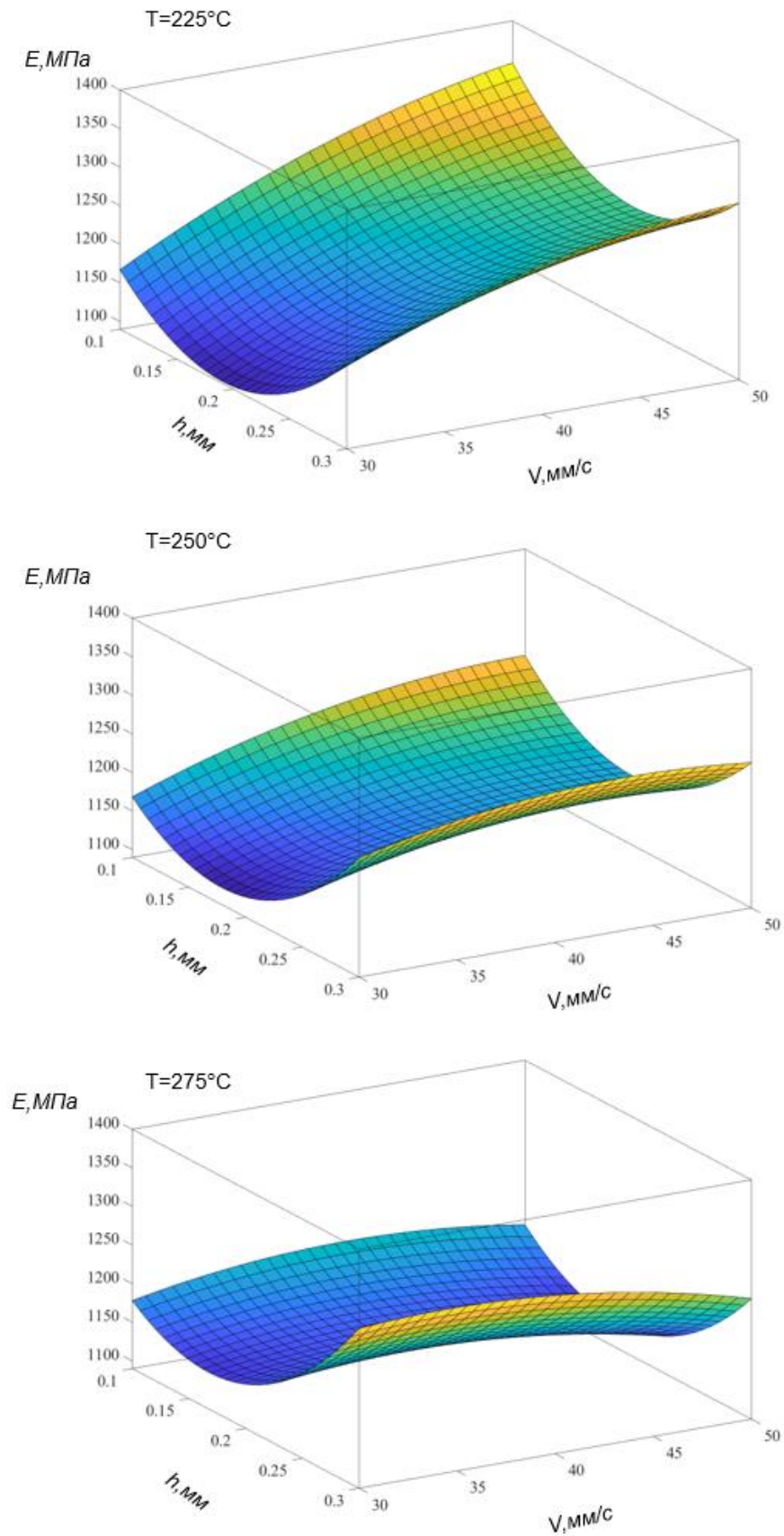


Рисунок 64 – Параметрические поверхности модуля упругости образцов, напечатанных с углом наклона раstra  $90^{\circ}$

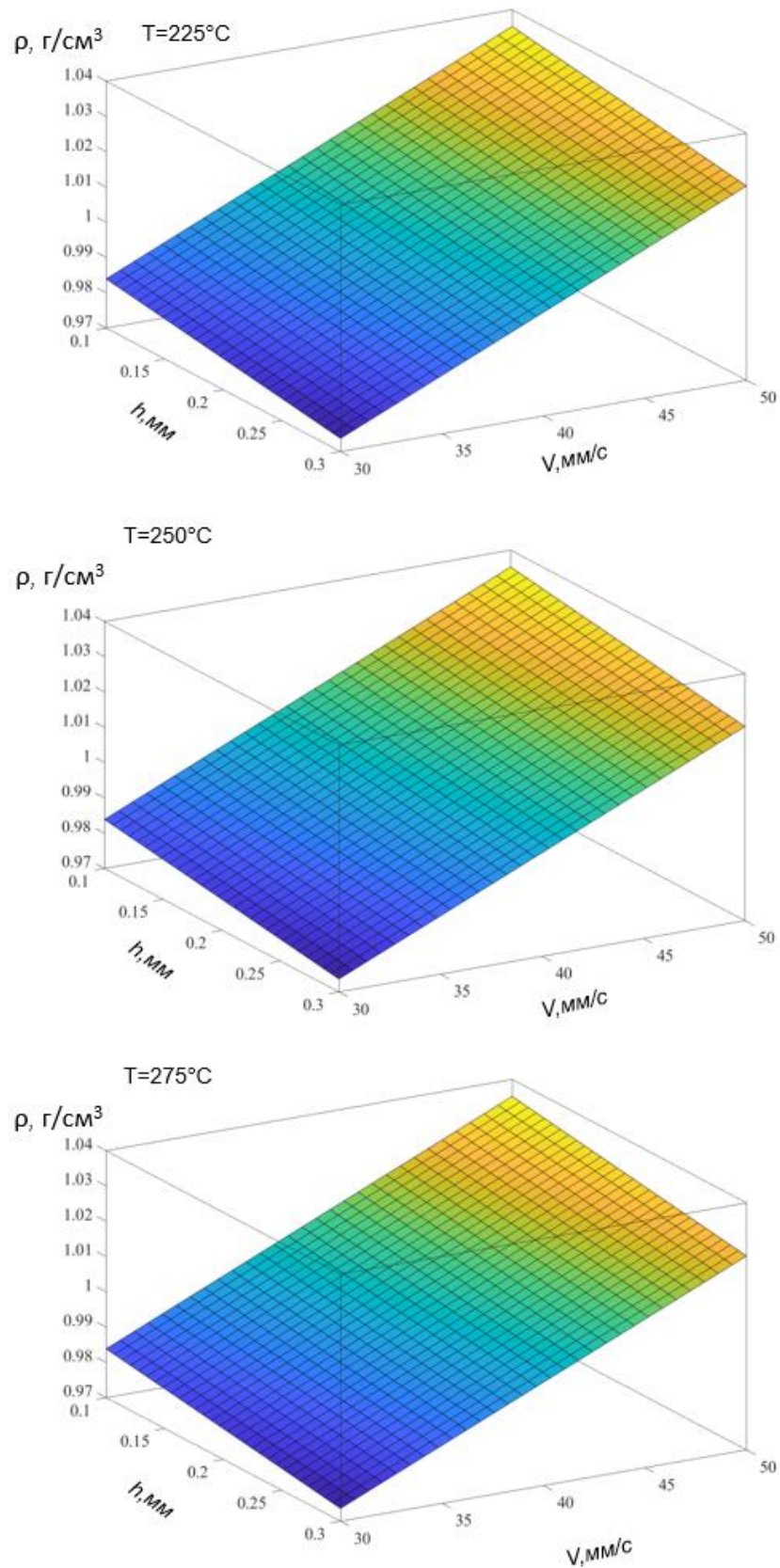


Рисунок 65 – Параметрические поверхности плотности образцов, напечатанных с углом наклона раstra  $0^\circ$

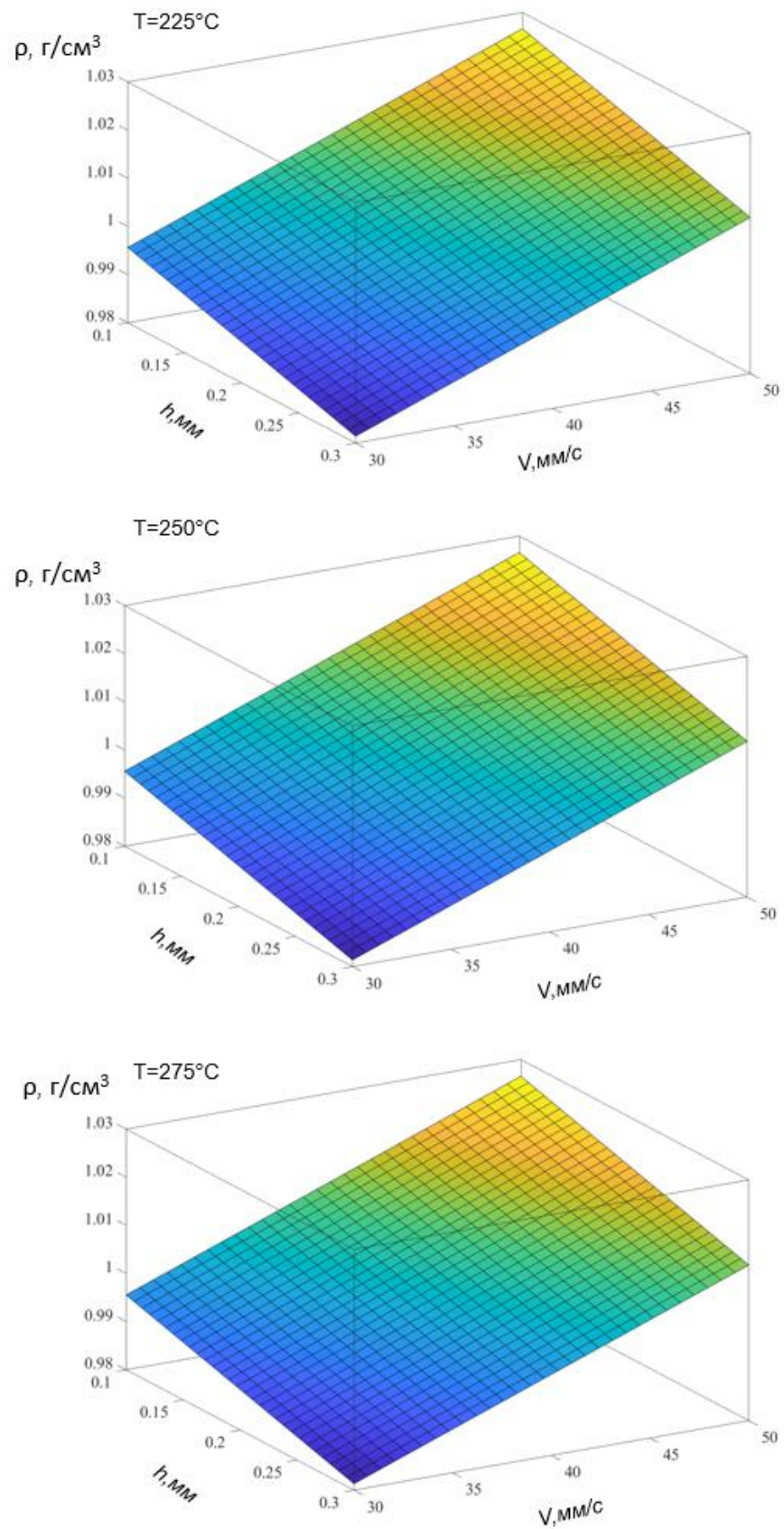


Рисунок бб – Параметрические поверхности плотности образцов, напечатанных с углом наклона раstra  $90^\circ$



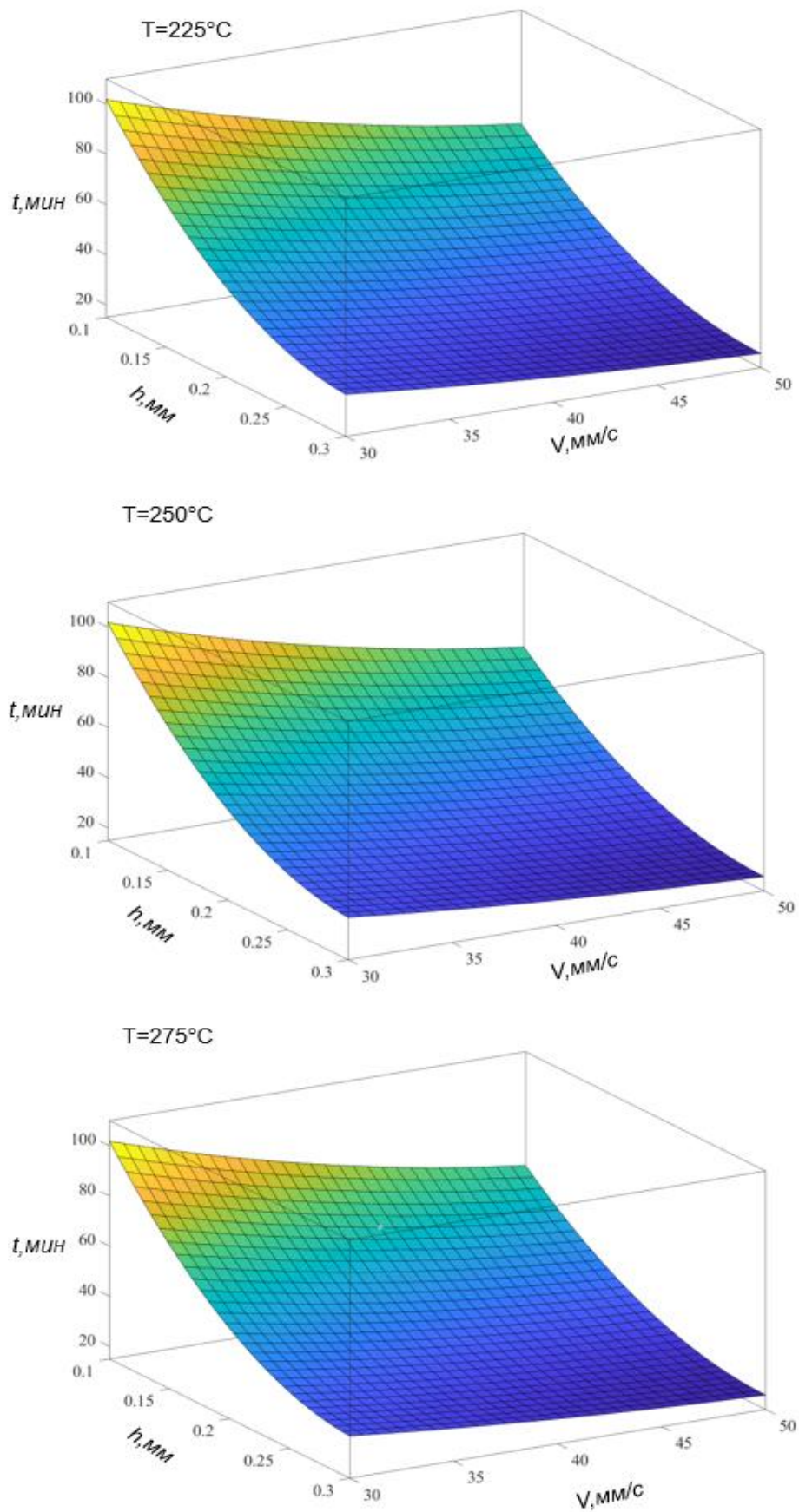


Рисунок 67 – Параметрические поверхности времени печати образцов, напечатанных с углом наклона раstra  $0^{\circ}$

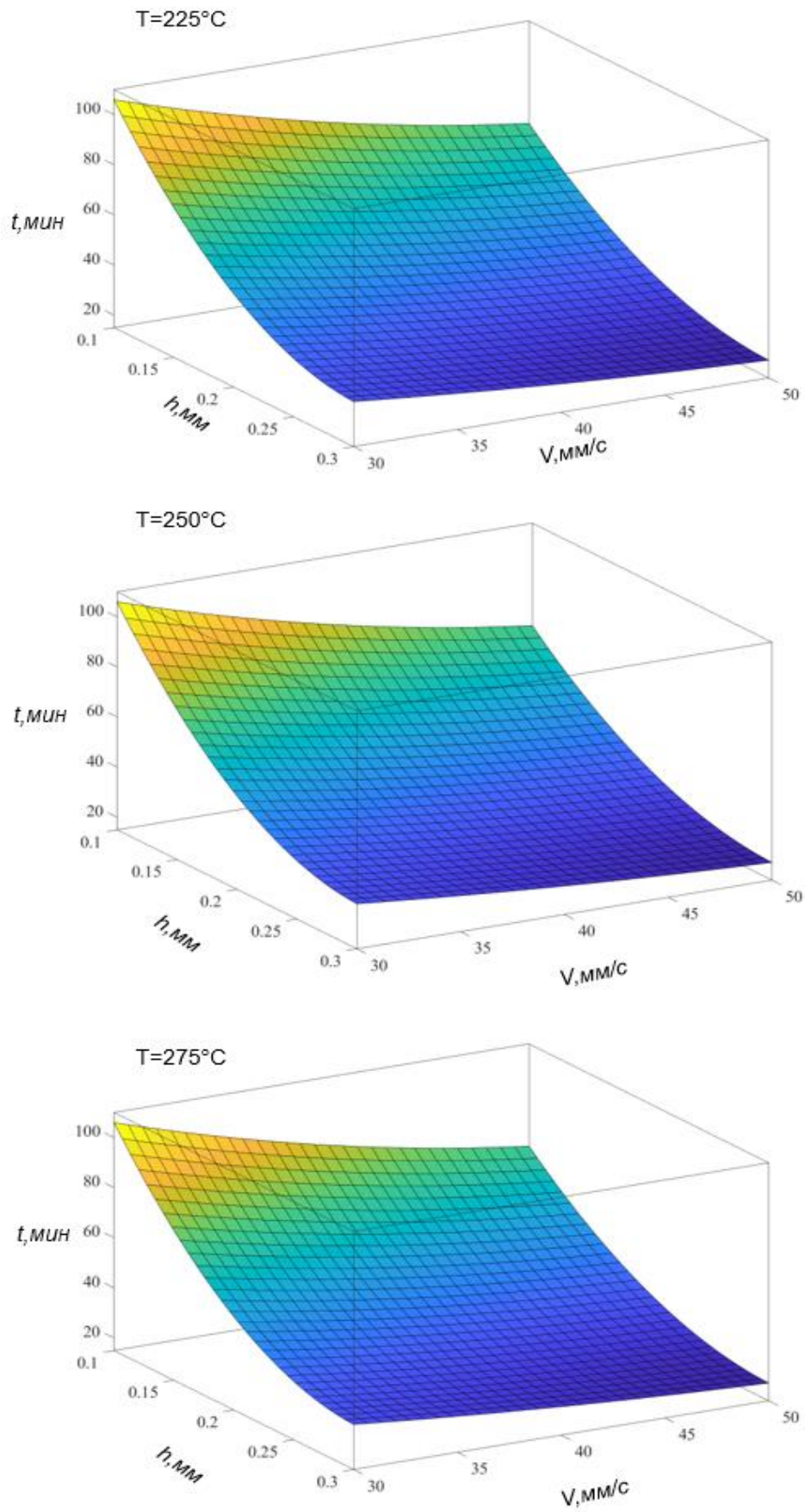


Рисунок 68 – Параметрические поверхности времени печати образцов, напечатанных с углом наклона раstra  $90^{\circ}$

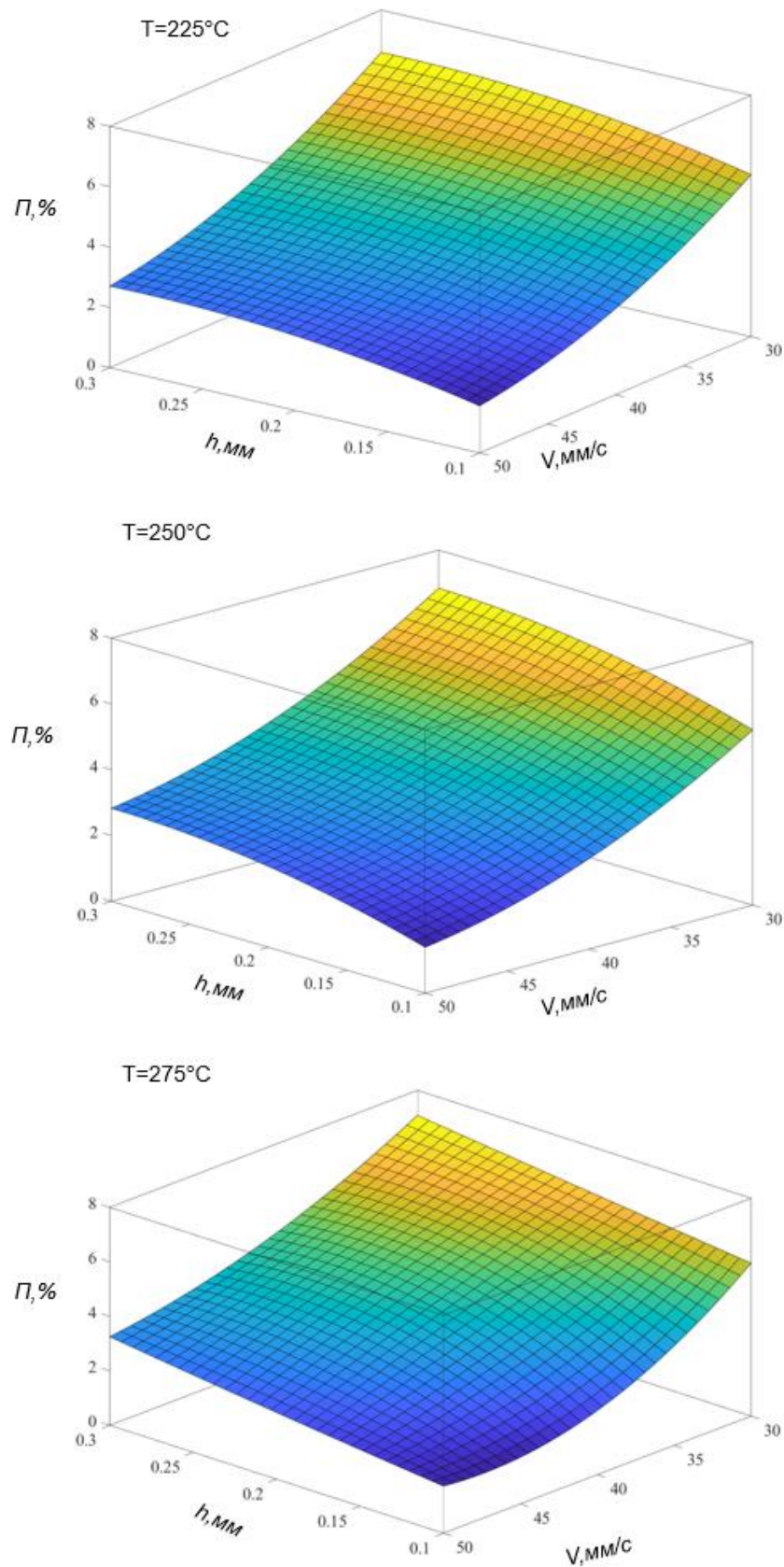


Рисунок 69 – Параметрические поверхности пористости образцов, напечатанных с углом наклона раstra  $0^{\circ}$

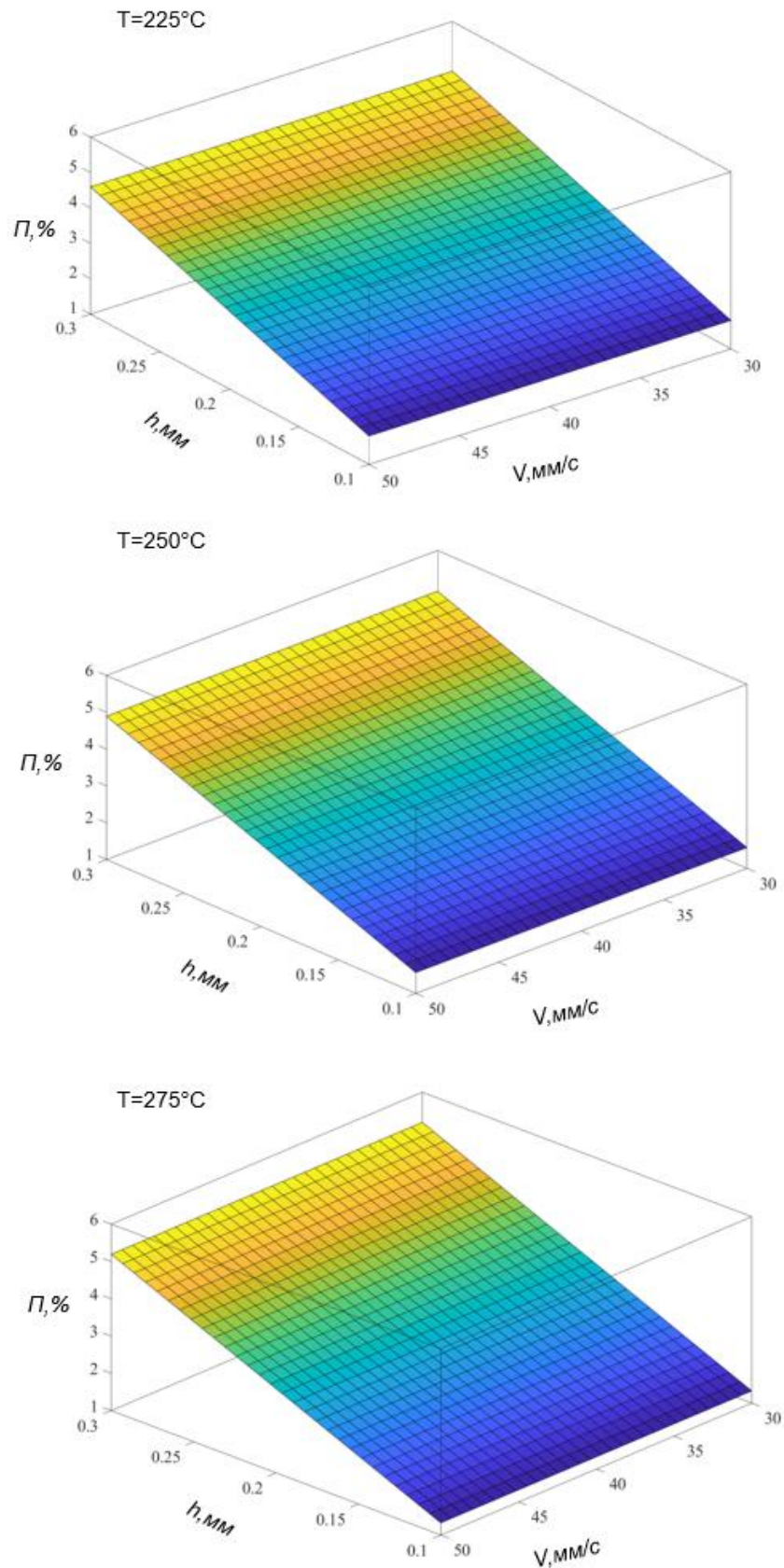


Рисунок 70 – Параметрические поверхности пористости образцов, напечатанных с углом наклона раstra 90°

При сравнении результатов, полученных по регрессионным зависимостям (таблица 17, 18) и экспериментальным данным (таблица 15, 16), установлено, что модель, построенная по плану Вох-Веһкен, имеет 7% погрешности, а модель, построенная по плану полнофакторного эксперимента, - 5%. Таким образом, обе регрессионные модели имеют погрешность не более 10% и могут быть применимы для выбора рациональных параметров печати. Однако для экономии времени и материала целесообразнее использование модели, построенной по плану Вох-Веһкен, предполагающей проведение 15 экспериментов вместо 27 по полнофакторному плану.

Проведенные исследования позволили оценить влияние технологических параметров процесса FDM-печати на свойства образцов и обоснованно принять их в качестве обобщенных параметров процесса в функции критерия качества изделия. При этом следует отметить, что степень их влияния на свойства изделия неодинакова. При наименьшей высоте слоя (0,1 мм) наблюдаются наилучшие механические свойства, среднее значение предела прочности при растяжении составляет 42 МПа для образцов с углом наклона раstra  $0^\circ$  и 23 МПа для образцов с углом наклона раstra  $90^\circ$ , при этом наблюдаются наилучшие показатели пористости, которая в среднем составляет 3%, но времени на печать потребуется в два раза больше, чем при высоте слоя 0,2 мм. С увеличением высоты слоя наблюдаются ухудшения механических свойств на 23% (при предельных значениях  $h = 0,1$  мм и при  $h = 0,3$  мм) и увеличение пористости в 2-3 раза, но при этом время печати уменьшается в два раза. Температура печати оказывает незначительное влияние на механические свойства по сравнению с высотой слоя. С увеличением температуры печати наблюдаются ухудшения механических характеристик на 5%, пористость уменьшается на 3%. На время печати температура не оказывает какого-либо влияния. Скорость печати, как и высота слоя, оказывает большое влияние на физико-механические свойства. По экспериментальным данным (образцы с высотой слоя 0,1 мм) видно, что при уменьшении скорости печати наблюдаются ухудшения механических характеристик на 10-15%. В других образцах (высота слоя 0,2 и 0,3 мм) с

уменьшением скорости печати наблюдается увеличение механических характеристик так же на 10-15%. При уменьшении скорости печати пористость увеличивается в 2-3 раза. Скорость печати оказывает большое влияние на время печати: при увеличении скорости время печати сокращается в среднем на 30%.

Таким образом, если критериальными требованиями являются механические характеристики и низкая пористость, рекомендуются следующие режимы печати:  $T=225^{\circ}\text{C}$ ;  $V=50\text{мм/с}$ ;  $h=0,1\text{мм}$ . Если критериальным требованием является производительность, то режимы печати следующие:  $T=225^{\circ}\text{C}$ ;  $V=50\text{мм/с}$ ;  $h=0,3\text{мм}$ , при условии, что выполняется требование по прочности.

#### **4.2 Исследование влияния постобработки на физико-механические свойства**

На основании анализа для исследований были выбраны следующие методы постобработки:

- термическая постобработка в дисперсной среде (NaCl, тальк, гипс). Использование дисперсной среды в процессе постобработки позволяет уменьшить температурные деформации образцов. Данный метод прост в реализации и не требует специального оборудования [154,155,158];

- термическая постобработка в форме с давлением. Постобработка в форме осуществляется в специальных формах, подобных формам для литья под давлением или прессования. Использование металлических форм дает возможность использовать в качестве обработки не только отжиг, но и плавку (нагрев выше температуры плавления) [155,158];

- комбинированный метод термической постобработки. Такое сочетание воздействий позволяет улучшать физико-механические свойства изделий не только по сравнению с необработанными, но и обработанными в дисперсной среде, поскольку добавление третьего фактора — давления, оказывает положительное влияние на процесс формирования межслойной связи [155,158,160];

- термическая постобработка в вакуумном пакете. Технология термической постобработки в вакуумном пакете дает значительно лучшие результаты с точки зрения искажения размеров изделий по сравнению с отжигом со свободной деформацией, но требует наличие специального оборудования [156,159].

На основании выбранных методов постобработки была разработана методика экспериментальных исследований по влиянию постобработки на физико-механические свойства образцов, полученных методом FDM-печати, с использованием термопластичных материалов.

### 4.3 Методика экспериментальных исследований

#### 4.3.1 Материал образцов

В качестве модельного (стандартного) термопластичного материала использовался АБС-пластик марки REC. Паспортные характеристики материала приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Основные свойства АБС-пластика марки REC

Показатель	Значение
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,05
Прочность на растяжение, МПа	29,6
Модуль упругости при растяжении вдоль слоев, ГПа	1,27
Прочность на изгиб, МПа	65,4
Модуль упругости на изгиб, ГПа	2,14
Прочность на сжатие, МПа	49,3
Модуль упругости на сжатие, ГПа	1,71
Диаметр нити для печати, мм	1,75

С целью выбора параметров печати и постобработки перед началом экспериментов определялись термические и реологические характеристики

материала для печати. Термические характеристики измерялись методом, основанным на измерении теплового потока между исследуемым образцом и эталоном в контролируемых температурных условиях, с помощью дифференциального сканирующего калориметра SKZ1052F. Показатель текучести расплава измерялся на установке ПТР-ЛАБ-11 по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 11645-2021 (температура – 230 °С, нагрузка – 5 кг).

Термические и реологические характеристики АБС-пластика, используемого для печати образцов, приведены в таблице 20.

Таблица 20 – Термические и реологические характеристики АБС-пластика марки REC

Показатель	Значение
Температура стеклования, °С	64,6
Температура кристаллизации, °С	130
Температура плавления, °С	230
Начальная температура деструкции, °С	360
Конечная температура деструкции, °С	441
Показатель текучести расплава, г/10 мин	9,89

Перед началом печати катушка с филаментом предварительно высушивалась при температуре 80°С в течение 5 часов, для чего помещалась в вакуумный сушильный шкаф Labtex LT-VO/20. Затем катушка загружалась в принтер в бокс подачи и подогрева филамента.

#### 4.3.2 Подготовка образцов и режимы печати

Для проведения исследований механических свойств использовались тестовые образцы в форме лопаток в соответствии с ГОСТ 11262-2017. Предпечатная подготовка заключалась в проектировании трехмерной модели образца с использованием САПР SolidWorks, сохранении геометрии в формате STL



и разбиении на слои с помощью программного обеспечения UltimakerCura5.2.1 (рисунок 71).

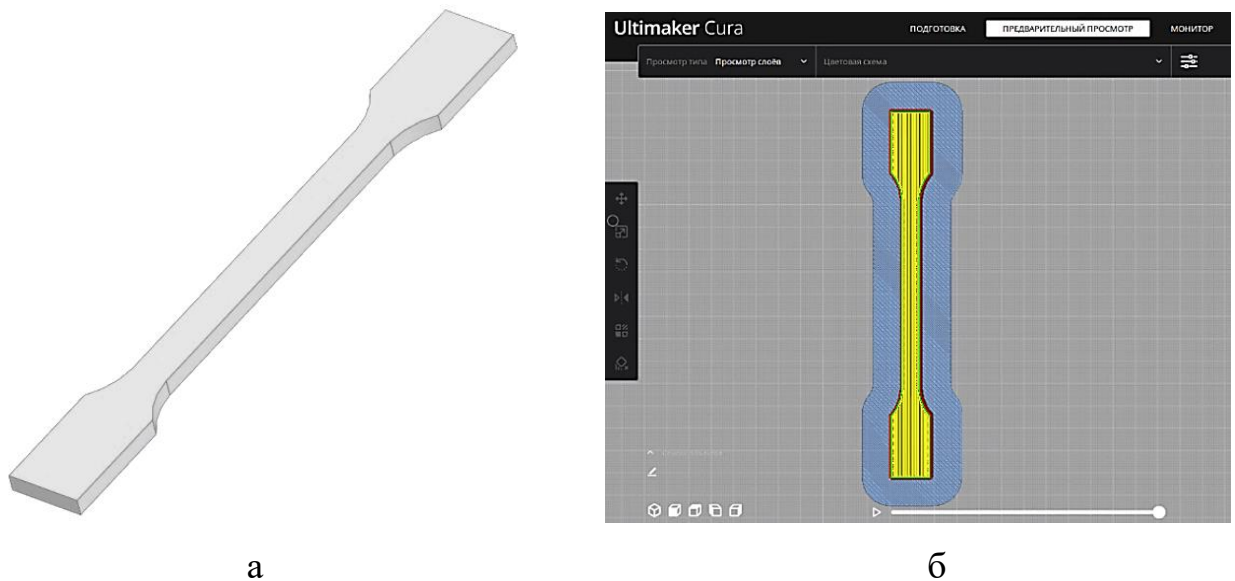


Рисунок 71 – Предпечатная подготовка образцов: а - трехмерная модель образца, выполненная в САПР SolidWorks; б – обработка модели в ПО UltimakerCura5.2.1

Печать образцов производилась на 3D-принтере Total Z AnyForm 500 PRO, основные характеристики которого приведены в таблице 21.

Все образцы были напечатаны при ориентации, параллельной плоскости XY принтера. Значения угла наклона раstra были выбраны на основе анализа литературы, проведенного в главе 1, с целью исследовать анизотропию напечатанных образцов. Значения высоты слоя были выбраны из соображений влияния данного параметра на механические свойства готовых изделий. Основные режимы печати образцов приведены в таблице 22.

Для сочетаний угла наклона раstra и высоты слоя было напечатано по 5 образцов.

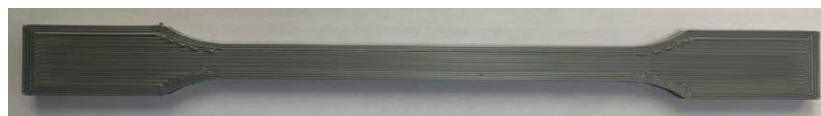
Таблица 21 – Основные характеристики 3D-принтера Total Z AnyForm 500 PRO

<b>ПЕЧАТЬ</b>	
<b>Технология печати</b>	FDM/FFF (филамент), FGF (гранулы)
<b>Диаметр филамента</b>	1,75/2,85 мм
<b>Область печати (XYZ, mm)</b>	500x500x500
<b>Печатающая головка</b>	сменная (FDM/FGF)
<b>Максимальная температура экструдера</b>	350 °C (в базовой версии) 500 °C (в высокотемпературной версии)
<b>Максимальная температура в камере</b>	до 100 °C (в базовой версии) до 280 °C (в высокотемпературной версии)
<b>Минимальная высота слоя</b>	0,05 мм (50 мкм)
<b>РАСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ</b>	
<b>Ударопрочные</b>	ABS, ASA, SBS, PC
<b>Экологичные и дизайнерские</b>	PLA, PetG, CERAMO, композиты на основе PLA (дерево, металл)
<b>Гибкие</b>	TPU, FLEX, RUBBER, KAUCHUK ELASTIK
<b>Растворимые (поддержки)</b>	HIPS, PVA
<b>Выжигаемые и выплавляемые</b>	PMMA (CAST), WAX3D
<b>Угленаполненные и стеклонполненные</b>	TOTAL-TPU-CARBON, TOTAL-TPU-GLASS, TOTAL-SAN-AIR, TOTAL- ABS-GLASS, TOTAL-ABS-GLASS-TITAN
<b>Износостойкие</b>	Nylon, Polyketone, PP
<b>Высокотемпературные (в комплектации НОТ»)</b>	ULTEM 9085, ULTEM 1010, PEEK, PEKKPPSU, PSU, PEI, композиты на их основе

Таблица 22 – Основные режимы печати

<b>Температура печати, °C</b>	225
<b>Температура камеры, °C</b>	100
<b>Высота слоя, мм</b>	0,3
<b>Угол наклона растра, °</b>	0; 90
<b>Скорость печати, мм/с</b>	50
<b>Количество слоев стенки</b>	2
<b>Количество слоев крышки</b>	3
<b>Количество слоев дна</b>	3
<b>Заполнение, %</b>	100

На рисунке 72 приведены образцы с углами наклона растра 0°, 90° и толщиной слоя 0,3 мм.



а



б

Рисунок 72 – Образцы, изготовленные методом FDM печати с различным значением угла наклона раstra: а  $0^\circ$ , б  $90^\circ$  (высота слоя 0,3 мм)

Для сравнения механических характеристик было изготовлено 5 образцов методом литья под давлением. Для изготовления использовалась ручная литьевая машина РЛМ. Режимы процесса литья под давлением приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Режимы литья под давлением

Температура цилиндра, °С	245
Температура пресс-формы, °С	150
Выдержка в пресс-форме, мин	15

#### 4.3.3 Термическая постобработка в дисперсионной среде

Порошок, использованный в эксперименте, представлял собой измельченную поваренную соль NaCl. Измельчение частиц порошка производилось на высокоскоростном смесителе LANHANG SHR-10A. Полученный порошок выдерживался при  $200^\circ\text{C}$  в вакуумном сушильном шкафу LabtextLT-VO/20 в течение 30 минут для удаления влаги, затем охлаждался на воздухе при комнатной температуре. Напечатанные образцы помещались на слой порошка внутри металлического контейнера (рисунок 73, а), а затем покрывались дополнительным слоем порошка. Верхний слой утрамбовывался металлической пластиной (рисунок 73, б). Упакованные образцы помещались в муфельную печь Nabertherm N 41/H, предварительно разогретую до температуры  $190^\circ\text{C}$ , что выше температуры стеклования, но ниже температуры плавления материала филамента

(рисунок 73, в). Контроль нагрева порошка внутри контейнера осуществлялся термощупом. При достижении температуры порошка  $190^{\circ}\text{C}$  запускался таймер печи. Образцы выдерживались при заданной температуре в течение 30 минут. После термообработки контейнер с образцами охлаждался при комнатной температуре.



а

б



в

Рисунок 73 – Термическая постобработка в порошке NaCl:

- а – образцы на слое порошка NaCl; б – контейнер с утрамбованным порошком;  
в – контейнер с образцами в муфельной печи

#### 4.3.4 Термическая постобработка в форме с давлением

Для проведения экспериментов была спроектирована специальная пресс-форма, представляющая собой негативный отпечаток формы образца. Форма была

изготовлена из алюминиевого сплава марки АД000 (ГОСТ 4784-2019). Образец помещался в гнездо формы (рисунок 74, а), затем прижимался пластиной, по форме совпадающей с формой образца для испытаний (рисунок 74, б). Масса пластины составляла 300 г. Таким образом, к образцу было приложено давление в 1,4 КПа. Форма с образцом помещалась в муфельную печь Nabertherm N41/H, предварительно разогретую до температуры 190°C (рисунок 74, в). Контроль нагрева формы осуществлялся термощупом. Как только температура формы достигала 190°C, запускался таймер печи. Образцы выдерживались при заданной температуре в течение 30 минут. После термообработки пресс-форма с образцом охлаждалась при комнатной температуре.



а



б



в

Рисунок 74 – Термическая постобработка в форме с давлением:  
а – образец в форме; б – форма с приложенным давлением; в – форма с образцом в муфельной печи

#### 4.3.5 Комбинированный метод термической постобработки

Комбинирование воздействий при постобработке усиливает ее эффект как в плане улучшения свойств, так и в плане уменьшения деформаций образцов. Одним из вариантов комбинированной термической постобработки, приводящим к значительному улучшению механических свойств, является отжиг в дисперсной среде с приложенным давлением, которое создается с помощью крышки или дополнительных грузов. При проведении экспериментов образцы помещались в дисперсную среду (в первом случае гипс, во втором – тальк) (рисунок 75, а). Для дополнительного воздействия на среду использовалась пластина, которая оказывала давление 22,4 кПа (рисунок 75, б). Упакованные образцы помещались в муфельную печь Nabertherm N 41/Н, предварительно разогретую до температуры 200 °С, что выше температуры стеклования, но ниже температуры плавления материала филамента. Контроль нагрева порошка внутри контейнера осуществлялся термощупом. При достижении температуры порошка 200 °С, запускался таймер печи (рисунок 75, в). Образцы выдерживались при заданной температуре в течение 30 минут. После термообработки контейнер с образцами охлаждался при комнатной температуре.



Рисунок 75 – Термическая постобработка: а – образец в дисперсной среде; б – образец в дисперсной среде с давлением; в – образцы в муфельной печи

### 4.3.6 Термическая постобработка в вакуумном пакете

Напечатанные образцы помещались внутри вакуумного пакета (рисунок 76, а), а затем воздух откачивался с помощью вакуумного насоса НВР-4,5Д. Далее пакет запаивался с помощью вакуумной упаковочной машины Hotpoint ARISTON. Упакованные образцы помещались в муфельную печь Nabertherm N 41/Н, предварительно разогретую до температуры 190 °С. Дальнейшая методика не отличалась от комбинированной термической постобработки в дисперсионной среде с давлением и без.



Рисунок 76 – Термическая постобработка в вакуумном пакете, где: а – без включенного насоса; б – с включенным насосом

Следующий метод постобработки в вакуумном пакете заключался в нагреве образцов с включенным насосом. Напечатанные образцы помещались внутри вакуумного пакета с подключенным вакуумным насосом НВР-4,5Д. Упакованные образцы помещались в муфельную печь Nabertherm N 41/Н, предварительно разогретую до температуры 190°С. Контроль нагрева осуществлялся термощупом. При достижении температуры порошка 190 °С, запускался таймер печи. Образцы выдерживались при заданной температуре в течение 40 минут. После постобработки образец охлаждался при комнатной температуре. Использование вакуумного пакета позволяет уменьшить температурные деформации образцов. Включенный вакуумный насос позволяет увеличить адгезию между слоями за счет увеличения площади контакта.

#### 4.3.7 Методы исследований свойств образцов

В ходе работ были проведены исследования прочности на растяжение, пористости и деформаций в результате термической постобработки напечатанных образцов.

Исследования прочности на растяжение проводились на универсальной испытательной машине РЭМ50А\_РЭ в соответствии с ГОСТ 11262-2017 по стандартной методике.

Исследования пористости проводились на основании определения плотности образцов. Для измерения плотности использовались гидростатические весы СЕ224-С.

Деформации образцов в результате термической постобработки оценивались по изменению размеров в трех направлениях по сравнению с исходными образцами. Для этого на всех образцах до и после термической постобработки производились измерения длины  $L$ , ширины шейки  $W$  и высоты  $H$  (рисунок 77). Измерения проводились с использованием электронного цифрового штангенциркуля (разрешение = 0,01 мм, точность = 0,03 мм) и лазерного 3д сканера.

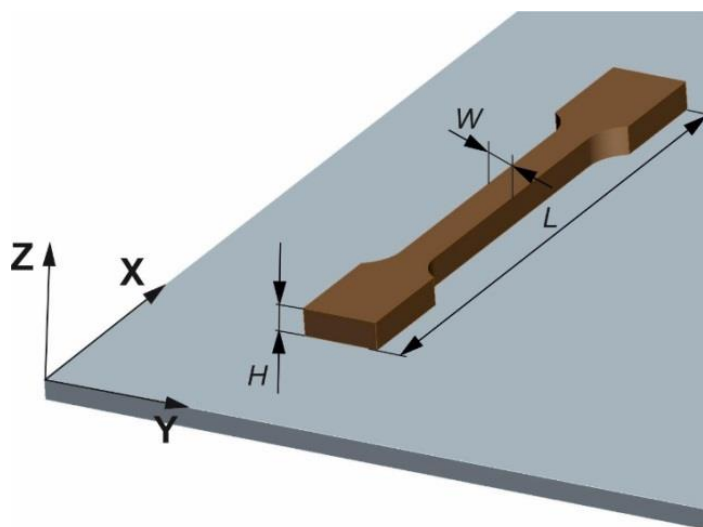


Рисунок 77 – Схема измерений образца



Изменения размеров  $\Delta$  рассчитывались по формулам:

$$\Delta L = \frac{L_{post} - L_0}{L_0} 100\% \quad (58)$$

$$\Delta W = \frac{W_{post} - W_0}{W_0} 100\% \quad (59)$$

$$\Delta H = \frac{H_{post} - H_0}{H_0} 100\%, \quad (60)$$

где  $L_0$ ,  $W_0$ ,  $H_0$  и  $L_{post}$ ,  $W_{post}$ ,  $H_{post}$  – размеры образца до и после постобработки соответственно.

Внутреннюю структуру образцов до и после термообработки исследовали на поляризационном микроскопе А15.0908.

#### 4.4 Результаты влияния постобработки на прочностные свойства образцов

В таблице 24 представлены результаты экспериментальных исследований влияния постобработки на физико-механические свойства образцов.

Таблица 24 – Результаты постобработки

Вид постобработки	Прочность на растяжение, МПа	Пористость, %	Деформации по длине, мм	Деформации по ширине, мм	Деформации по высоте, мм
Литьевые образцы	34,43	1,14	-	-	-
КО – 0°/90°	29,42 / 20,92	6,63 / 4,28	-	-	-
СОЛЬ – 0°/90°	33,1 / 23,11	3,12 / 3,42	-3,88 / -0,36	-2,28 / -10,59	0,31 / 28,69
Давление 0°/90°	36,98 / 30,71	1,72 / 2,07	0,69 / 1,73	3,83 / 4,09	-8,85 / -5,04
Гипс	31,2	2,85	1,01	-0,53	1,19
Гипс с давлением (22,4 кПа)	32,4	0,73	-0,38	2,12	-2,38
Тальк	30,3	2,05	-3,86	-1,27	-3,8
Тальк с давлением (22,4 кПа)	31,8	0,12	0,66	4,78	-1,19
Вакуумный пакет	33,8	1,26	-0,57	-1,48	2,38
Вакуумный пакет с насосом 0°/90°	35,3 / 33,5	1,14 / 2,36	-0,24 / 0,6	-1,12 / 1,12	2,38 / -3,8

Обозначения в таблице: КО – контрольный образец, не подвергавшийся постобработке.

На рисунке 78 приведены кривые «напряжение – перемещение» для образцов, подвергавшихся термической постобработке по методикам, описанным выше. Для сравнения приведены результаты испытаний контрольных образцов, не подвергавшихся постобработке, и образцов, полученных литьем под давлением.

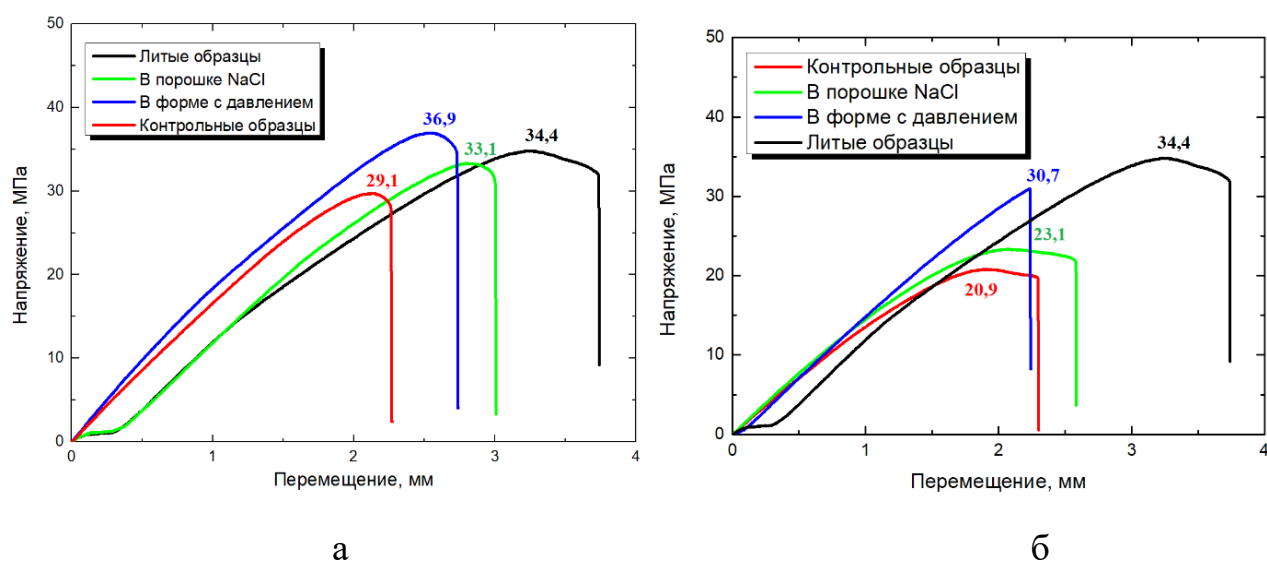


Рисунок 78 – Кривые «напряжение – перемещение» для образцов после FDM-печати и термической постобработки при различных углах наклона раstra:

а – 0°; б – 90°

Анализ кривых, приведенных на рисунке 78, позволяет сделать следующие выводы. Термическая постобработка в порошке NaCl позволяет увеличить прочностные свойства образцов в среднем на 10-13 % в зависимости от угла наклона раstra. Больше увеличение прочности наблюдается для образцов с углом наклона 0° (33,1 МПа по сравнению с 29,1 МПа для контрольных образцов без постобработки). При этом предел прочности на растяжение этих образцов сравним с пределом прочности образцов, полученных литьем под давлением (34,4 МПа). Для образцов с углом наклона 90° наблюдается незначительное увеличение прочности после постобработки в NaCl.

Постобработка в форме с давлением позволила увеличить прочностные свойства образцов в среднем на 25-40% по сравнению с контрольными. Причем увеличение предела прочности было более значительным для образцов с углом наклона  $90^\circ$  с 20,9 МПа до 30,7 МПа, что лишь на 12% меньше, чем у литых образцов (рисунок 78).

Таким образом, с точки зрения улучшения механических характеристик, напечатанных образцов оба метода постобработки можно считать перспективными, однако постобработка в форме с давлением дает лучшие результаты.

На рисунке 79 приведены кривые «напряжение – перемещение» для образцов, подвергавшихся термической постобработке по методикам, описанным выше. Для сравнения приведены результаты испытаний контрольных образцов, не подвергавшихся постобработке.

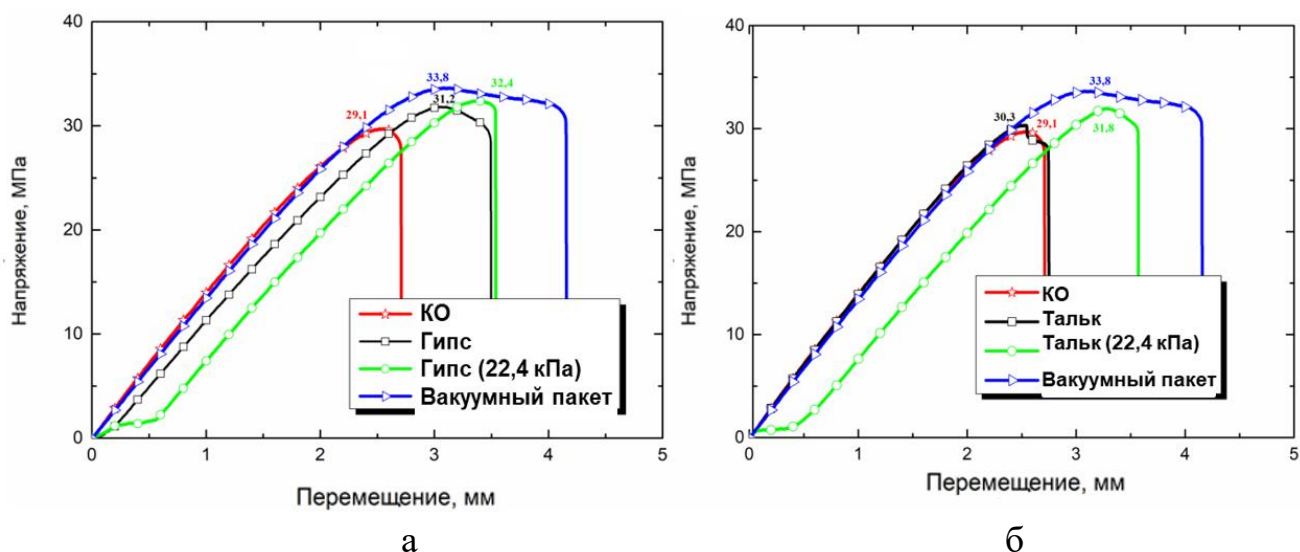


Рисунок 79 – Кривые «напряжение – деформация» для образцов после FDM-печати и термической постобработки в вакуумной пакете и в дисперсной среде:

а – гипс, б – тальк

Анализ кривых, приведенных на рисунке 79, позволяет сделать следующие выводы. Термическая постобработка в гипсе без давления позволяет увеличить прочность на растяжение в сравнении с контрольными образцами с 29,1 МПа до

31,2 МПа, а с приложенным давлением 22,4 кПа прочность увеличивается до 32,4 МПа. Постобработка в тальке без давления позволяет увеличить прочность на растяжение до 30,3 МПа, а с приложенным давлением 22,4 кПа прочность увеличивается до 31,8 МПа. Постобработка в вакуумном пакет увеличивает прочность на растяжение до 33,8 МПа. Таким образом, с точки зрения улучшения механических характеристик, напечатанных образцов все методы постобработки можно считать перспективными, однако постобработка в вакуумном пакете дает лучшие результаты, но требует наличия необходимого оборудования для проведения исследования.

По результатам экспериментальных работ было проведено исследование влияния термической постобработки в вакуумном пакете с насосом на физико-механические свойства образцов, изготовленных методом FDM-печати. На рисунке 80 представлены результаты испытаний прочности на растяжение. Из анализа кривых следует, что такой вид обработки позволяет увеличить прочность на растяжение образцов, напечатанных с углом наклона раstra  $0^\circ$ , на 20%. Для образцов, напечатанных с углом наклона раstra  $90^\circ$ , прочность на растяжение увеличивается на 65%.

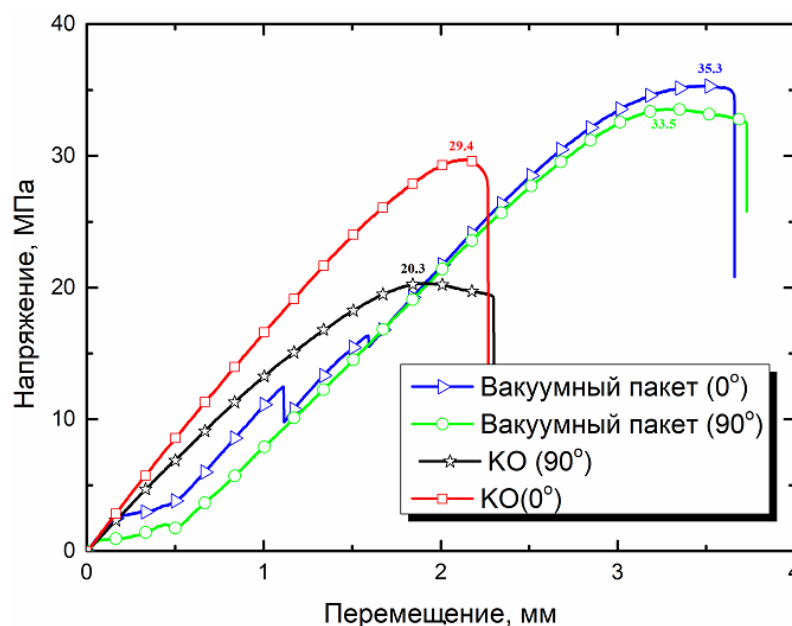


Рисунок 80 – Результаты испытаний прочности на растяжение образцов до и после термической постобработки в вакуумном пакете с подключенным насосом

Из анализа кривых, представленных на рисунке 80, следует, что термическая постобработка в вакуумном пакете с подключенным насосом позволяет увеличить прочность на растяжение образцов, напечатанных с углом наклона раstra  $0^\circ$ , на 20%. Для образцов, напечатанных с углом наклона раstra  $90^\circ$ , прочность на растяжение увеличивается на 65%.

#### 4.5 Результаты влияния постобработки на пористость образцов

На рисунке 81 представлены результаты исследований пористости образцов, подвергавшихся термической постобработке по методикам, описанным выше. Для сравнения приведены результаты испытаний контрольных образцов, не подвергавшихся постобработке, и образцов, полученных литьем под давлением.

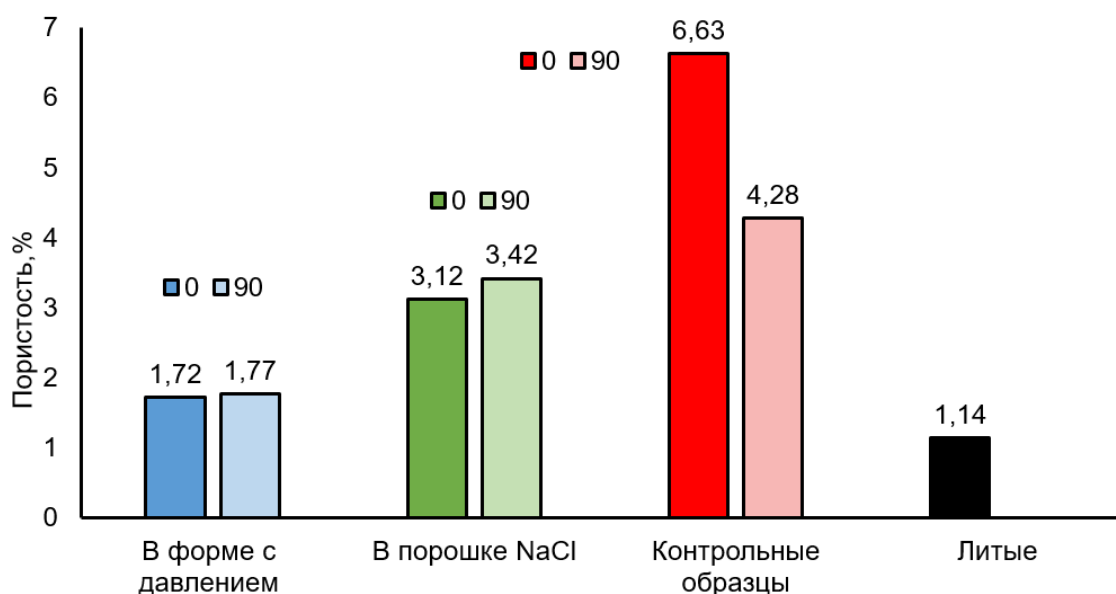


Рисунок 81 – Пористость образцов после термической постобработки

Как видно из рисунка 81, заметное уменьшение пористости наблюдается у всех образцов, подвергнутых постобработке. Причем угол наклона раstra не играет значительной роли в изменении величины пористости. Так, для всех образцов с углом наклона раstra  $0^\circ$  пористость уменьшается на 52% при обработке в порошке NaCl и 75% при обработке в форме с давлением. Для образцов с углом наклона

растра 90° – на 20% и 59% соответственно. Результаты исследований так же свидетельствуют о том, что наилучшие результаты с точки зрения сравнения с образцами, полученными литьем под давлением, достигаются при обработке в форме с давлением.

На рисунке 82 представлены результаты исследований пористости образцов, подвергавшихся термической постобработке по методикам, описанным выше. Для сравнения приведены результаты испытаний контрольных образцов, не подвергавшихся постобработке.



Рисунок 82 – Пористость образцов после термической постобработки с давлением и без

Как видно из рисунка 82, заметное уменьшение пористости наблюдается у всех образцов, подвергнутых постобработке. При обработке в дисперсной среде пористость уменьшается на 58% при обработке в гипсовом порошке и 70% при обработке в тальке. При обработке в дисперсной среде с давлением 22,4 кПа пористость уменьшается на 89% при обработке в гипсовом порошке и 98% при обработке в тальке. Результаты исследований свидетельствуют о том, что наилучшие результаты достигаются при обработке в тальке с давлением. На рисунке 83 представлены результаты исследования пористости образцов после термической постобработки в вакуумном пакете с включенным насосом.

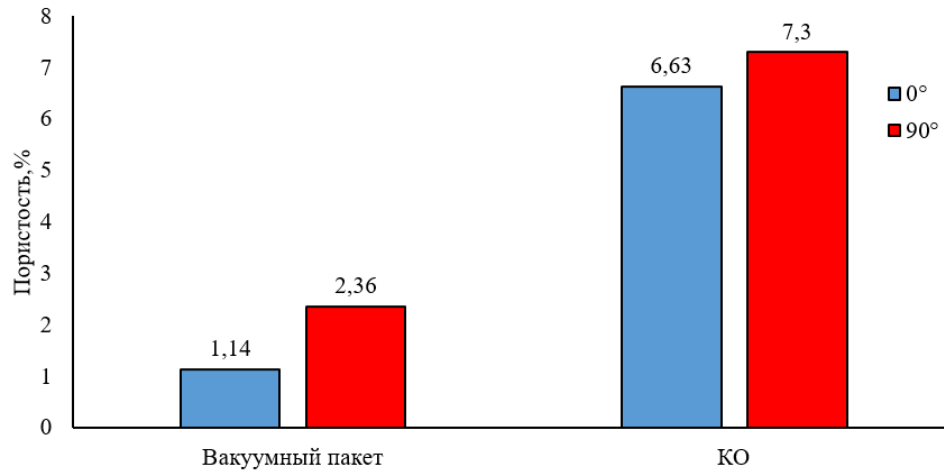


Рисунок 83 – Пористость образцов после термической постобработки в вакуумном пакете с включенным насосом

По результатам постобработки в вакуумном пакете с включенным насосом наблюдается заметное уменьшение пористости. Так у образцов с углом наклона растра  $90^\circ$  пористость уменьшилась на 68%, а у образцов с углом наклона растра  $0^\circ$  уменьшилась на 83%. Таким образом, уменьшение пористости и увеличение прочности после комбинированной термической постобработки можно объяснить заполнением межрастровых и межслойных пустот вследствие подплавления материала образца. Это хорошо видно на микрофотографиях образца до и после термической постобработки, представленных на рисунке 84.

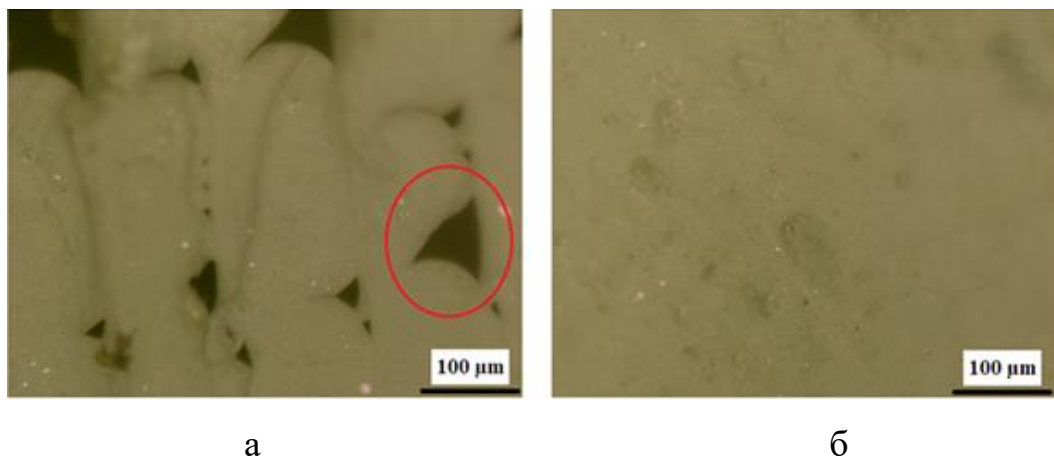


Рисунок 84 – Микрофотографии образцов: а – образцы до постобработки с видимыми дефектами печати (обведено красным); б – образцы после комбинированной постобработки

#### 4.6 Результаты влияния постобработки на деформацию образцов

Для определения деформаций использовался метод лазерного сканирования. Использовался лазерный 3D-сканер «Shining 3D».

Пример сканирования образца представлен на рисунке 85. Результаты сканирования и сравнение их с исходной 3D-моделью представлены на рисунке 86 и в таблице 25.

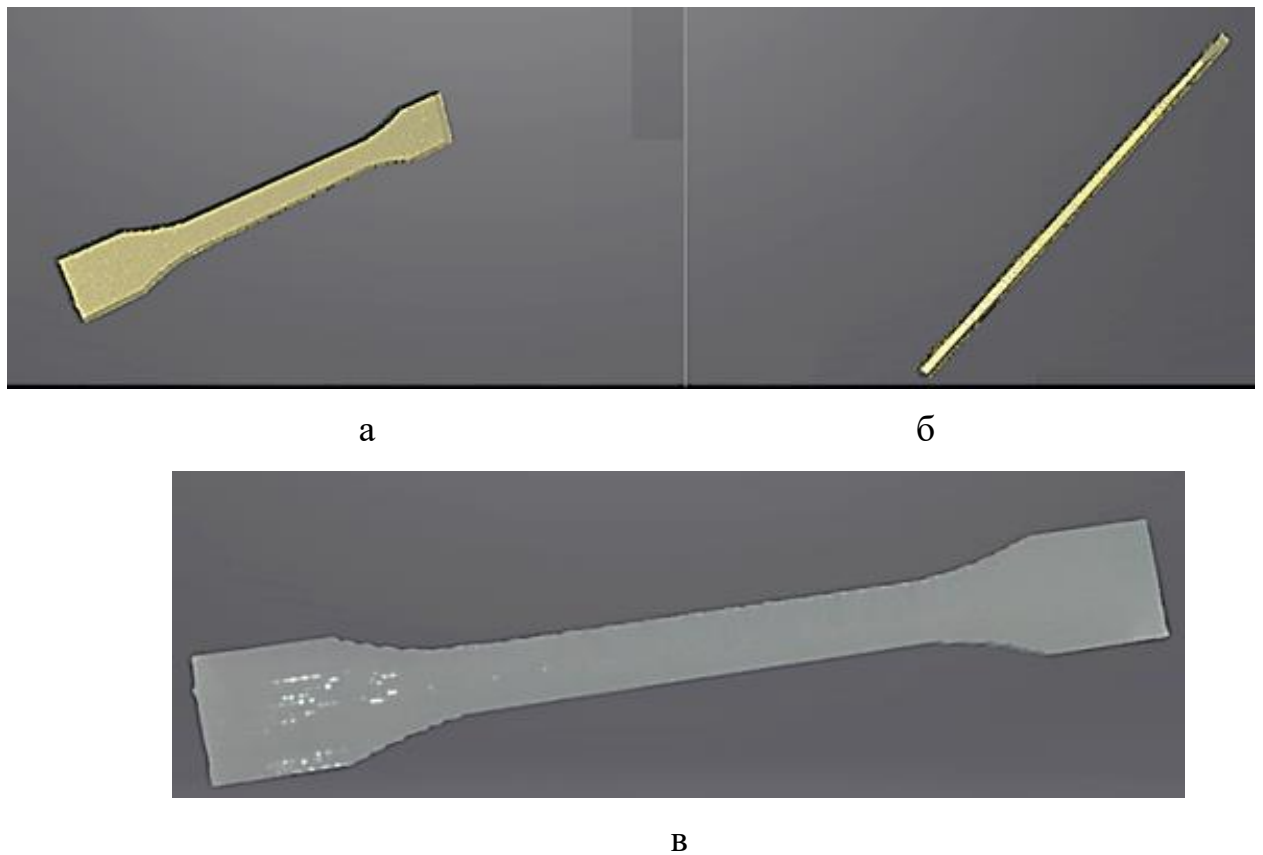


Рисунок 85 – Пример сканирования образца на 3D-сканере «Shining 3D»:  
а – сканирование первой части образца; б – сканирование второй части образца;  
в – итоговая модель образца



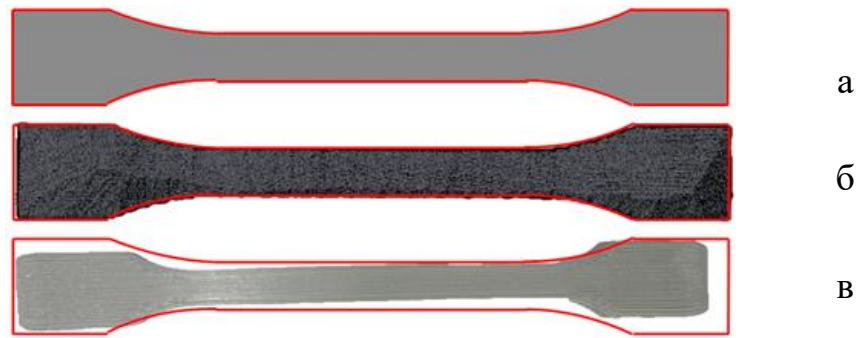


Рисунок 86 – Результат сканирования образца и сравнение с исходной моделью (изображена в виде красного контура):

а – 3D-модель; б – модель после FDM-печати, полученная на 3D-сканере;  
в – модель после постобработки, полученная на 3D-сканере

Таблица 25 – Результаты сканирования и сравнение их с исходной 3D-моделью

Параметры	3D - модель	После FDM-печати	После постобработки
Длина, мм	150	149,5	138,5
Ширина, мм	10	10,1	9,5
Высота, мм	4	3,9	4,6

На рисунке 87 представлены изменения размеров образцов в трех направлениях. Анализ рисунка 87 показывает, что деформации образцов имеют место как после постобработки в порошке NaCl, так и в форме с давлением. При этом большее изменение размеров по длине образца  $\Delta L$  и ширине шейки  $\Delta W$  (по осям X и Y соответственно) наблюдается после термообработки в порошке NaCl по сравнению с образцами, обработанными в форме с давлением. Это объясняется тем, что в форме образец зафиксирован в этих направлениях стенками формы. Однако для изменения высоты образца  $\Delta H$  (по оси Z) наблюдается обратная тенденция – для образцов после обработки в форме с давлением  $\Delta H$  либо превышает, либо сравнима с  $\Delta H$  образцов после обработки в порошке. Это можно объяснить тем, что в этом направлении образец испытывает при обработке в форме максимальное давление.

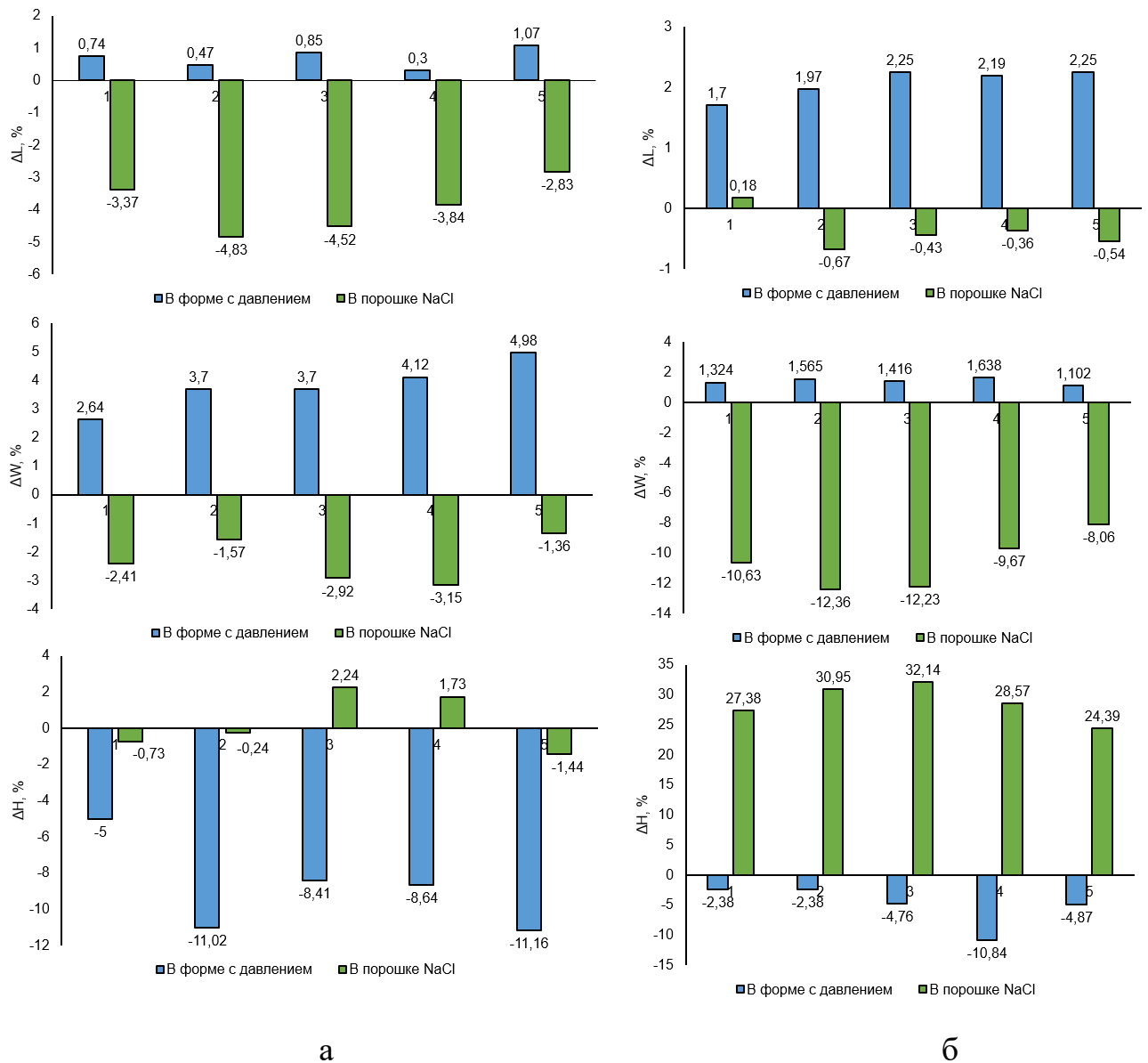


Рисунок 87 – Изменения размеров образцов после постобработки:

а – угол наклона раstra 0°; б – угол наклона раstra 90°

Эти же тенденции наблюдаются и на фотографиях контрольных образцов и образцов после обработки различными методами, представленных на рисунке 88.



Рисунок 88 – Деформации образцов после постобработки (сверху вниз – контрольный образец, образец после обработки в NaCl, образец после обработки в форме с давлением): а – угол наклона растра 0°; б – угол наклона растра 90°

Анализ данных, приведенных на рисунке 89 для постобработки различными методами, показывает, что деформации образцов имеют место как после постобработки в гипсовом порошке, так и в тальке. При этом большее изменение размеров по длине образца  $\Delta L$  в дисперсной среде и в дисперсной среде с давлением наблюдается после термообработки в тальке по сравнению с образцами, обработанными в гипсовом порошке и вакуумном пакете.

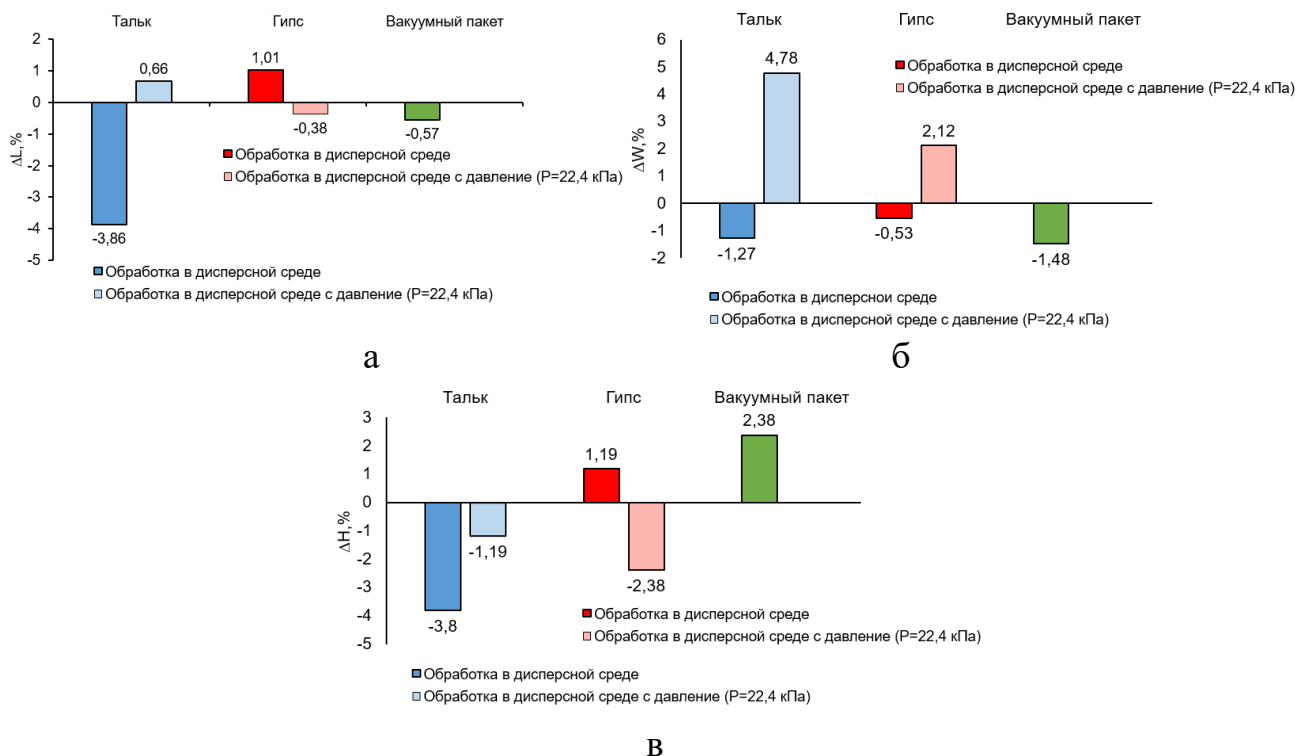


Рисунок 89 – Изменения размеров образцов после постобработки: а – изменения по длине; б – изменения по высоте; в – изменения по ширине

Эти же тенденции наблюдаются и на фотографиях контрольных образцов и образцов после обработки различными методами, представленных на рисунке 90.

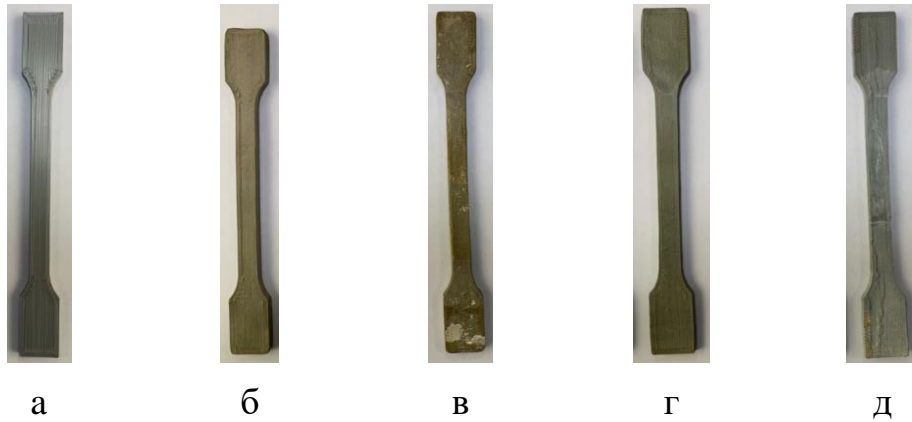


Рисунок 90 – Деформации образцов после постобработки:

а – контрольный образец, б–образец после обработки в тальке, в–образец после обработки в гипсе, г–образец после обработки в тальке с приложенным давлением 22,4 кПа , д – образец после обработки в гипсе с приложенным давлением 22,4 кПа

Образцы, подвергнутые термической постобработки в вакуумном пакете с подключенным насосом, представлены на рисунке 91.



Рисунок 91 – Образцы, изготовленные методом FDM печати, где: а - 0°; б - 90°

На рисунке 92 представлены Изменения размеров образцов после термической постобработки в вакуумном пакете с включенным насосом.

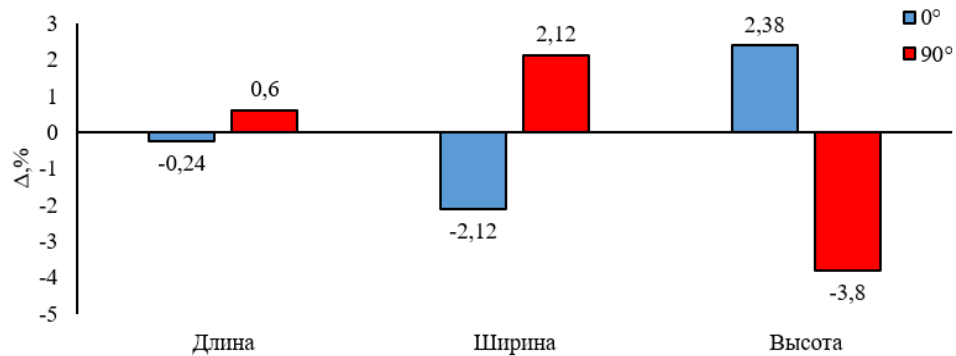


Рисунок 92 – Изменения размеров образцов после термической постобработки в вакуумном пакете с включенным насосом:

а – изменения по длине; б – изменения по ширине; в – изменения по высоте

При данном методе постобработки наблюдаются незначительные деформации. Изменения размеров по длине составляет 0,4 мм, по ширине 0,2 мм, по высоте 0,2 мм. Сохранять размеры в процессе постобработки позволяет вакуумный пакет с подключенным вакуумным насосом.

Результаты исследования деформации образцов после термической постобработки соответствуют данным других исследований, приведенным в главе 1. Однако значительные деформации, наблюдаемые для образцов после постобработки всеми рассмотренными методами, говорят о том, что необходима корректировка методик и разработка новых технологических способов проведения термической постобработки, поскольку в случае конкретного изделия такие деформации недопустимы.

На основе анализа литературы и с учетом результатов экспериментальных исследований сформулированы рекомендации по выбору метода постобработки [161] для реальных изделий, в том числе сложной формы, получаемых FDM-печатью, в зависимости от предъявляемых к ним требований (таблица 26).

Таблица 26 – Взаимосвязь методов постобработки и свойств изделий, получаемых FDM-печатью

Методы постобработки	Свойства изделия	Характер изменения	Простота реализации	Область применения
<b>Поверхностная обработка</b>				
Химическая постобработка	Качество поверхности (шероховатость)	++	+	Изделия любой формы с высокими требованиями к качеству поверхности
	Физико-механические свойства	+		
Термическая постобработка	Качество поверхности (шероховатость)	++	-	
	Физико-механические свойства	+		
<b>Объемная постобработка</b>				
Отжиг без ограничения деформаций (одноэтапный)	Физико-механические свойства:		+	Изделия любой формы без требований к точности размеров
	– прочность на растяжение	++		
	– прочность на сжатие	+		
	– прочность на изгиб	+		
	– относительное удлинение	++		
	– модуль упругости	++		
	– твердость (микротвердость)	+		
	Деформации	--		
Степень кристалличности	+			
Отжиг без ограничения деформаций (многоэтапный)	Физико-механические свойства:		+	Изделия любой формы с высокими требованиями к точности размеров
	– прочность на сжатие	+		
	– ударная вязкость	+		
	Деформации	++		
Отжиг в дисперсной среде	Физико-механические свойства:		+	Изделия любой формы с низкими требованиями к точности размеров
	– прочность на растяжение	++		
	– прочность на сжатие	++		
	– твердость (микротвердость)	+		
	– плотность	++		
Деформации	-			
Отжиг в жесткой форме	Физико-механические свойства:		-	Изделия простой формы с низкими требованиями к точности размеров
	– прочность на растяжение	+		
	– пористость	++		
	Деформации	+		

Методы постобработки	Свойства изделия	Характер изменения	Простота реализации	Область применения
Отжиг в эластичной оболочке	Физико-механические свойства:		+	Изделия простой формы с высокими требованиями к качеству поверхности и точности размеров
	– прочность на сдвиг	++		
	– прочность на изгиб	++		
	– пористость	+		
	Деформации	+		
	Степень кристалличности	+		
Прессование без ограничения деформаций	Физико-механические свойства:		–	Изделия любой формы преимущественно из композиционных материалов с низкими требованиями к точности размеров
	– прочность на растяжение	++		
	– прочность на сдвиг	++		
	– модуль упругости	++		
	– пористость	+		
	Деформации	+		
Степень кристалличности	++			
Прессование в дисперсной среде	Физико-механические свойства:		–	Изделия любой формы преимущественно из композиционных материалов с низкими требованиями к точности размеров
	– прочность на растяжение	++		
	– предел текучести	++		
	– модуль упругости	++		
	Степень кристалличности	++		
Прессование в эластичной оболочке	Физико-механические свойства:		–	Изделия любой формы преимущественно из композиционных материалов на основе полиамида с низкими требованиями к точности размеров
	– прочность на растяжение	++		
	– ударная вязкость	++		
	Степень кристалличности	++		

В данной таблице: (+ +) – значительное улучшение свойств (от 50% до нескольких раз); (+ –) – незначительное улучшение свойств, метод не требует специального оборудования; (– –) – значительное ухудшение свойств (от 50% до нескольких раз); (–) – незначительное ухудшение свойств, метод требует специального оборудования.

## Выводы по главе 4

По результатам работ, проведенных в четвертой главе, можно сделать следующие выводы:

1. Для реализации разработанной структуры технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками были проведены экспериментальные исследования и установлены регрессионные зависимости физико-механических свойств изделий от параметров процесса печати, позволяющих уменьшить материалоемкость изделия при достижении заданных характеристик.

2. Проведены исследования влияния постобработки на физико-механические свойства изделия. На основе анализа литературы и с учетом результатов экспериментальных исследований сформулированы рекомендации по выбору метода постобработки для реальных изделий, в том числе сложной формы, получаемых FDM-печатью, в зависимости от предъявляемых к ним требований.

3. Рассмотренные технологии термической постобработки образцов, полученных методом FDM-печати, являются перспективными для улучшения физико-механических свойств (прочности на растяжение и пористости). Метод постобработки в дисперсной среде, состоящей из гипсового порошка, является наиболее целесообразным для постобработки изделий сложной формы.

4. Проведенные исследования по определению деформаций образцов после FDM-печати и постобработки методом лазерного сканирования показали приемлемую точность и могут использоваться для измерений деформаций реальных изделий.

5. Проведенные в главе 4 исследования будут использованы для конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати реальных изделий с заданными характеристиками.



## ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанная в главе 2 структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками использована при подготовке производства рабочего колеса вентилятора (рисунок 93).

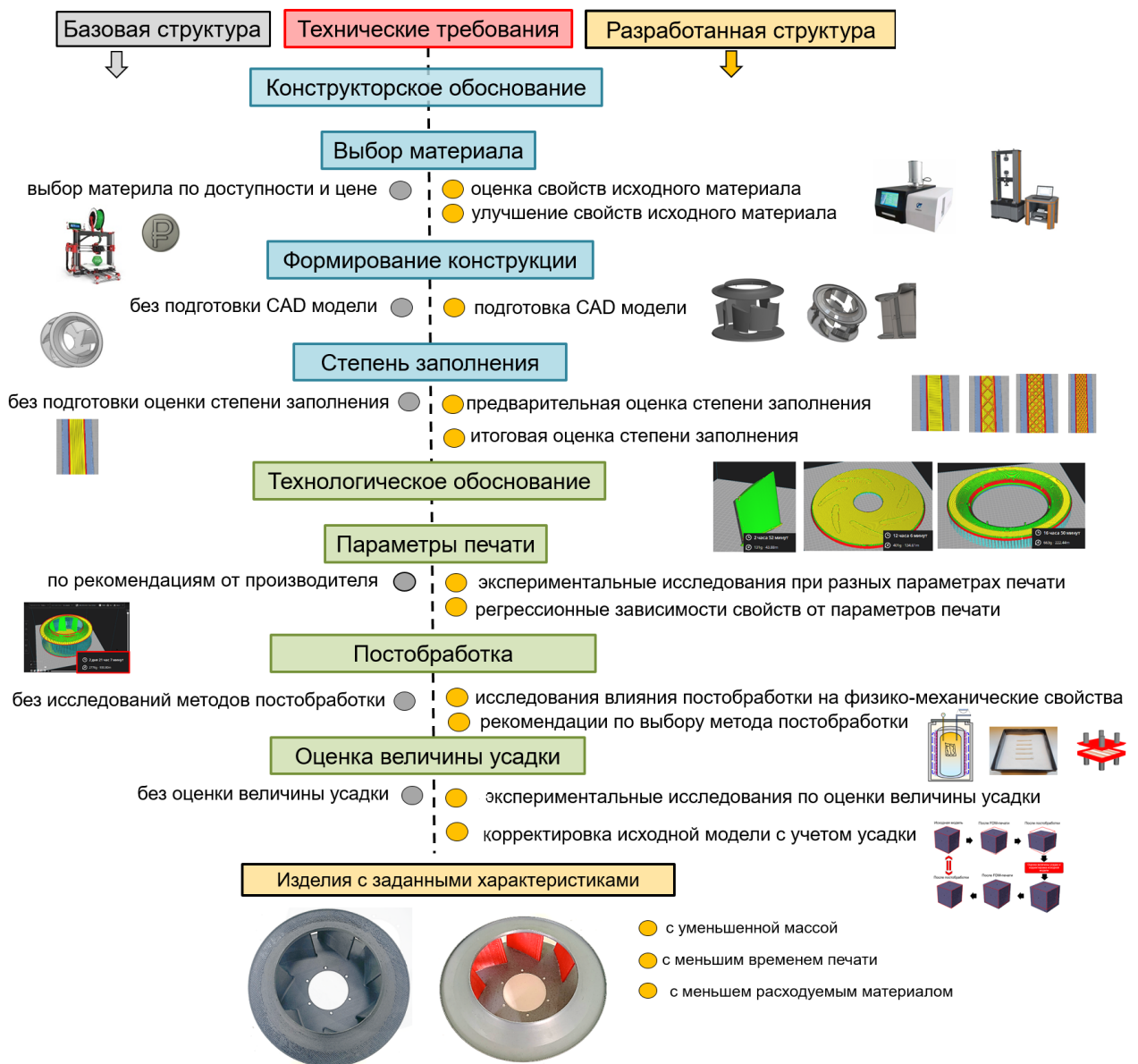


Рисунок 93 – Подготовка производства рабочего колеса вентилятора по базовой и разработанной структуре конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками

## 5.1 Характеристика изделия

Рабочее колесо вентилятора предназначено для перемещения воздуха и различных газов и может быть использовано в конструкциях различных типов вентиляторов. Вентиляторы применяются не только для подачи, но и для откачки, забора воздуха или газа. Область применения вентиляторов очень широка: медицина, автомобиле- и судостроение, авиация, космонавтика, тепло- и газоснабжение, кондиционирование и многие другие виды использования. Технические требования на изделие «рабочее колесо вентилятора» представлены ниже.

1. Рабочее колесо вентилятора должно быть диаметром 355 мм и обладать массой меньше, чем аналогичное колесо из металла.

2. Рабочее колесо вентилятора должно быть изготовлено из полимерных или полимерно-композиционных материалов.

3. При оборотах до 3000 об. /мин. рабочее колесо диаметром 355 мм не должно деформироваться больше 1,5 мм или разрушаться вследствие воздействия центробежной силы.

4. Температура перемещаемого воздуха через рабочее колесо от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ .

5. При работе в заданном температурном диапазоне рабочее колесо не должно деформироваться или разрушаться под нагрузкой вследствие изменения механических характеристик материала из-за температурного воздействия.

## 5.2 Конструкторское обоснование режимов FDM-печати изделия рабочего колеса вентилятора

В качестве термопластичного материала использовался АБС пластик, являющимся самым распространенным пластиком для FDM-печати.

Геометрия исходной расчетной области представляет собой твердотельную модель, спроектированную в SolidWorks 2022. Построение трехмерной модели

проходило в два этапа. На первом этапе исходная модель в формате stl обрабатывалась в программном пакете Geomagic Design X 2020. После чего полученные эскизы сечений модели экспортировались в SolidWorks 2022, где происходило построение твердотельной модели.

В работе рассматривались три варианта конструкции рабочего колеса вентилятора. Изготавливать рабочее колесо вентилятора цельным является нецелесообразным из-за большого количества поддержек, требующих дополнительного расхода материала. В связи с этим исходная модель колеса была разделена на две части с плоскостью разъема в середине лопаток параллельно плоскости дисков. В область разъема было добавлено крепление «шип-паз». В другом варианте конструкции исходная модель колеса была разделена на девять частей. На рисунке 94 представлены варианты конструкции рабочего колеса.

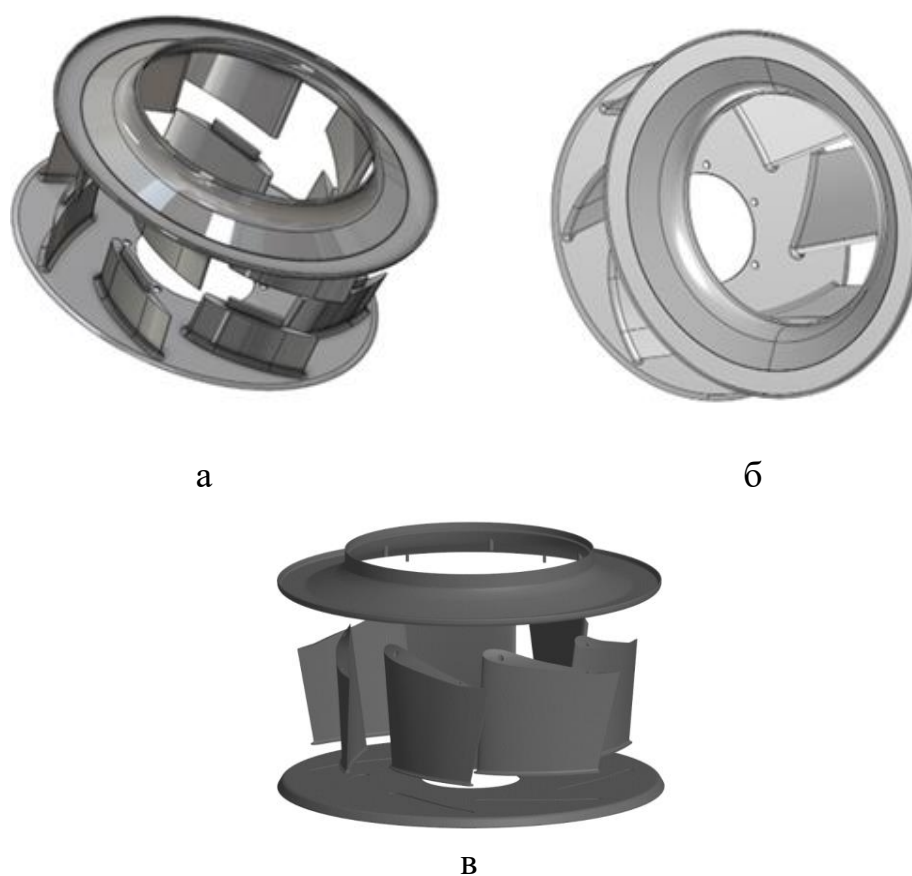


Рисунок 94 – Варианты конструкции рабочего колеса: а – колесо из двух частей; б – цельное колеса; в – колесо из восьми частей

В работе рассматривается задача по расчету и определению характера распределения механических напряжений и деформаций при различной степени заполнения в изделии «рабочее колесо вентилятора».

Данная задача относится к классической задаче теории упругости, ее решение было получено с использованием модульной среды численного моделирования Comsol Multiphysics.

Структурный анализ - наиболее распространенное применение метода конечных элементов, которое позволяет исследовать различные типы нагрузок, включая напряжение, деформацию, излом и так далее. Линейные структурные статические уравнения выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_{bx} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_{by} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_{bz} &= 0, \end{aligned} \quad (61)$$

где  $\sigma$  представляет собой нормальное напряжение,  $\tau$  - напряжение сдвига,  $F_{bx}$ ,  $F_{by}$  и  $F_{bz}$  - силы тела на единицу объема, действующие в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно. Центробежная сила определяется следующим образом:

$$F_c = \rho r \omega^2, \quad (62)$$

где  $F_c$  – центробежная сила,  $\omega$  - скорость вращения,  $r$  и  $\rho$  показывают радиус и плотность материала, соответственно.

Вращение колеса происходит в стационарных условиях. На заднем диске задавались условия упорного подшипника для ограничения осевого перемещения колеса. Поверхность переднего диска выбрана в качестве плоскости для отсчета поворота колеса. Скорость вращения колеса составляла 3000 об/мин. Эффективные характеристики материала в зависимости от степени заполнения рассчитывались по формулам (27) – (32).

Механические характеристики материала представлены в таблице 27.

Таблица 27 – Механические характеристики материалов

Наименование показателей	АБС пластик
Модуль упругости при растяжении, ГПа	2
Прочность на растяжение, МПа	50
Коэффициент Пуассона	0,39
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1050

Для определения заданных характеристик готового изделия были рассчитаны эффективные характеристики АБС пластика при разной степени заполнения по установленным зависимостям в 3 главе (27) - (32). Результаты расчетов представлены в таблице 28.

Таблица 28 – Эффективные характеристики АБС пластика в зависимости от степени заполнения

Степень заполнения, %		100	80	60	40	20
Модуль упругости, ГПа	$E_{11}$	1,3961	1,0732	0,6284	0,368	0,1105
	$E_{33}$	1,5289	0,998	0,4129	0,1439	0,1412
Модуль сдвига, ГПа	$G_{11}$	0,5992	0,4768	0,2926	0,0301	0,0233
	$G_{33}$	0,3111	0,2049	0,0858	0,0443	0,0352
Коэффициент Пуассона	$\mu_{12}$	0,2465	0,21207	0,1300	0,0825	0,0613
	$\mu_{32}$	0,1649	0,12534	0,0736	0,0443	0,0352
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_m$	1050	840	630	420	210

В расчетной области была сгенерирована сетка конечных элементов (рисунок 95), при этом тип конечных элементов был «тетраэдр», размер – «крупный». В итоге вычислительная сетка состояла из 30 тысяч основных элементов.

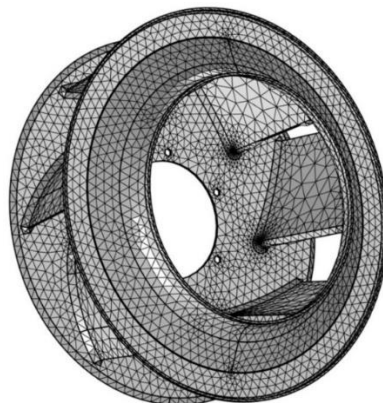


Рисунок 95 – Сетка конечных элементов модели рабочего колеса вентилятора

Результаты численного моделирования распределения механических напряжений и упругих перемещений представлены на рисунке 96, 97.

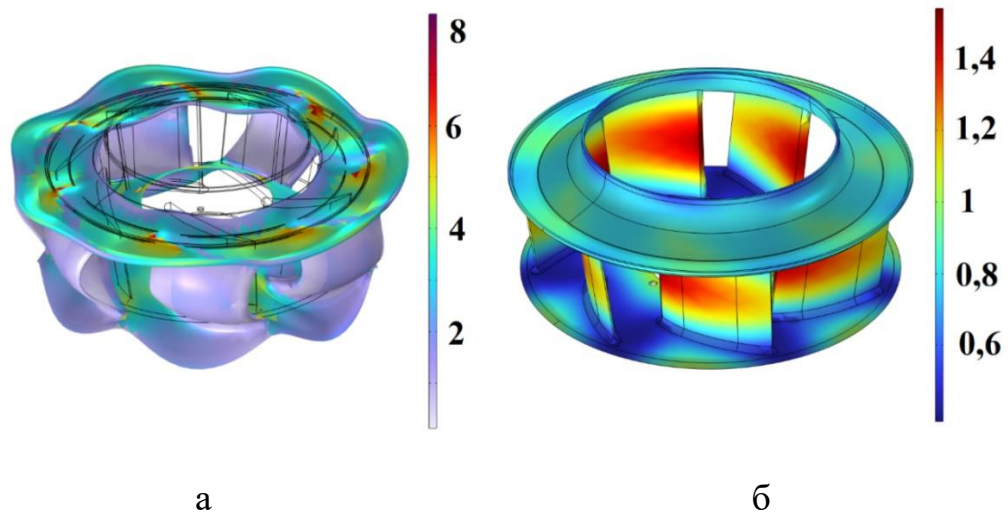


Рисунок 96 – Результаты численного моделирования рабочего колеса вентилятора из АБС пластика при степени заполнения 60%: а - распределение напряжений, МПа; б – распределение упругих перемещений, мм

Для разъемной модели был проведен расчет распределения механических напряжений и упругих перемещений, в ходе которого было выявлено изменение характера распределения напряжений.

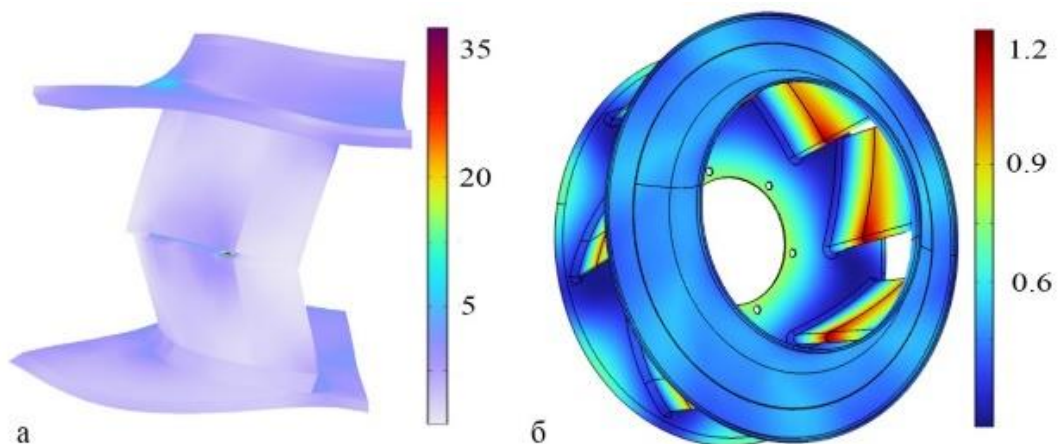


Рисунок 97 – Результаты численного моделирования разъемной модели: а - распределение механических напряжений в области лопатки колеса, МПа; б – распределение упругих перемещений, мм

Полученные напряжения сравнивались с допускаемыми напряжениями, которые определяются исходя из коэффициента запаса и предельных напряжений. Коэффициент запаса прочности для рабочего колеса вентилятора составляет 1,5.

$$K_{\text{зап.}} = \frac{[\sigma]_{FDM}}{K_{\text{кн}} * \sigma_{\text{max}}} \quad (63)$$

где:  $\sigma_{FDM}$  – предел прочности материала для FDM-печати;  $K_{\text{кн}}$  – коэффициент концентрации напряжений (23);  $\sigma_{\text{max}}$  – максимальное напряжение при моделировании.

Максимальная концентрация напряжений находится на крепежном элементе «шип» и составила 32 МПа, максимальные деформации составили 1,2 мм. Таким образом, было выявлено, что АБС пластик (допускаемые напряжения - 26МПа) не пригоден для разъемного варианта изделия, так как напряжение превышает допускаемое. Поэтому для изготовления рабочего колеса вентилятора была выбрана конструкция, состоящая из девяти отдельных частей, с последующей сборкой. Для сравнения базовой структуры и разработанной структуры обоснования режимов FDM-печати были спроектированы два рабочего колеса вентилятора. Результаты моделирования фактических характеристик рабочего колеса вентилятора представлены в таблице 29.

Таблица 29 – Результаты моделирования рабочего колеса вентилятора из АБС пластика по двум методам

Методы	Базовая структура	Разработанная структура				
		100	80	60	40	20
Степень заполнения, %	100	100	80	60	40	20
Максимальные напряжения, МПа	14,5	14,5	10,1	8,1	8,4	4,3
Максимальные деформации, мм	1,01	1,01	1,04	1,49	2,58	2,3
Коэффициент запаса	1,69	1,69	1,29	1,34	1,21	0,93

По результатам расчетов и моделирования оптимальным значением степени заполнения для АБС пластика является 60%. Выбранное значение степени заполнения позволяет обеспечить изделию минимальную материалоемкость при соблюдении технических требований.

### 5.3 Технологическое обоснование FDM-печати изделия рабочего колеса вентилятора

В качестве оборудования для FDM-печати использовался 3D-принтер Total Z AnyForm 500 PRO (рисунок 98), характеристики которого представлены в таблице 30.



Рисунок 98 – 3D принтер Total Z AnyForm 500 PRO

Total Z AnyForm 500 PRO - промышленный 3D-принтер российского производства с большой камерой построения. Принтер работает как по технологии FDM (филамент), так и по технологии FGF (гранулы).

Таблица 30 – Характеристики печати принтера 3D -Total Z AnyForm 500 PRO

<b>Технология печати</b>	FDM (филамент), FGF (гранулы)
<b>Диаметр филамента, мм</b>	1,75/2,85
<b>Область печати (XYZ, мм)</b>	500×500×500
<b>Печатающая головка</b>	сменная (FDM/FGF)
<b>Макс. температура экструдера, °С</b>	500
<b>Макс. температура в камере, °С</b>	280
<b>Минимальная высота слоя, мм</b>	0,05



По результатам приведенных экспериментальных исследований в четвертой главе была проведена коррекция размеров модели с учетом усадки после FDM-печати и постобработки, а также с использованием нелинейных уравнений регрессии определены рациональные режимы печати, обеспечивающие уменьшение времени печати и уменьшение используемого материала. Режимы для печати представлены в таблице 31.

Таблица 31 – Основные режимы печати частей рабочего колеса вентилятора

Методы	Базовая структура	Разработанная структура
Температура печати, °С	250	225
Температура стола, °С	100	100
Высота слоя, мм	0,2	0,3
Скорость печати, мм/с	40	50
Степень заполнения, %	100	60

На рисунке 99 представлены элементы конструкции рабочего колеса вентилятора в ПО UltimakerCura5.2.1.

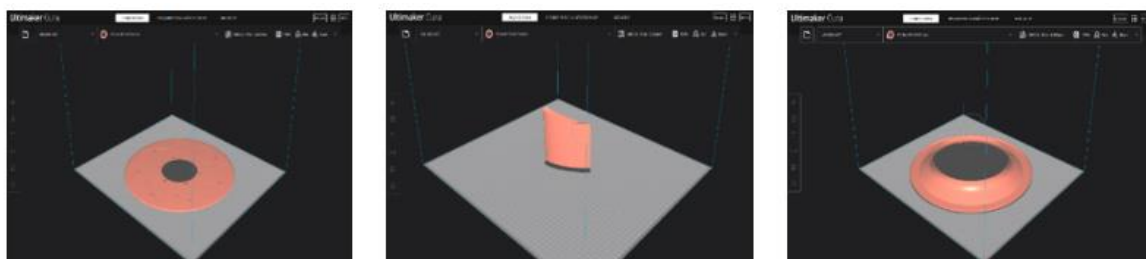


Рисунок 99 – Модели рабочего колеса вентилятора в ПО UltimakerCura5.2.1

Изготовленные элементы рабочего колеса вентилятора по разработанной структуре FDM-печати представлены на рисунке 100.

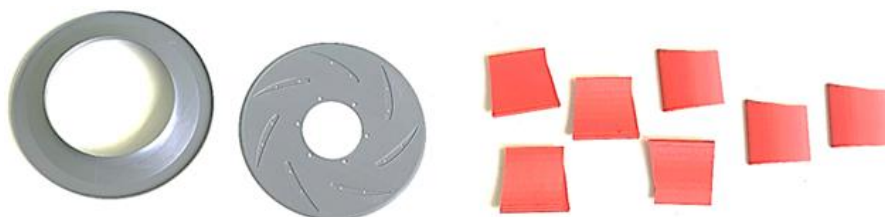


Рисунок 100 – Изготовленные методом FDM-печати элементы рабочего колеса из АБС пластика

В соответствии с разработанной структурой технологического обоснования режимов FDM-печати и на основании результатов экспериментальных исследований, выполненных в четвертой главе, был определен метод постобработки для улучшения физико-механических свойств рабочего колеса вентилятора. Метод постобработки в дисперсной среде (гипсе) является подходящим для применения на рабочее колесо вентилятора. Поскольку у данного метода постобработки наблюдаются деформации, то была проведена коррекция исходной модели (на 3,5%) с учетом усадки. Режимы постобработки в дисперсной среде (гипсе) следующие: температура – 190 °С; время – 40 минут.

Изготовленные рабочие колеса вентилятора по двум методам представлены на рисунке 101.

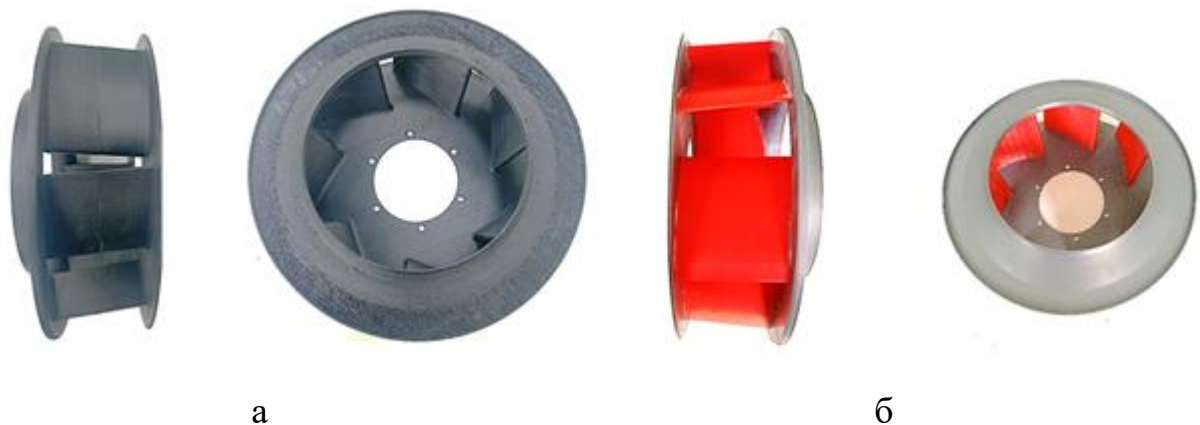


Рисунок 101 – Рабочее колесо вентилятора, изготовленное двумя методами:  
а – базовая структура; б –разработанная структура

Сравнение методов изготовления рабочего колеса вентилятора из АБС пластика представлено в таблице 32.

Таблица 32 – Методы изготовления рабочего колеса вентилятора

Методы	Масса изделия, г	Время печати, ч	Расход материала, г
Базовая структура	1611	168	2289
Разработанная структура	850	52	1050

Для определения целостности конструкции при повышенных скоростях и стойкости ее к воздействию механических нагрузок (вибрационных, ударных, скручивающих, ветровых) изготовленные рабочие колеса вентилятора были подвергнуты испытаниям на специализированном стенде.

#### **5.4 Оценка прочностных параметров рабочего колеса вентилятора экспериментальным методом**

При проведении испытаний рабочих колес вентилятора был использован специализированный стенд (рисунок 102), представляющий собой станину (1), защитный кожух (2), электродвигатель М2АА 090S 2 (3) под управлением небольшого универсального преобразователя частоты IDS-Drive серии «М» (220В 0.4кВт – 5.8кВт).



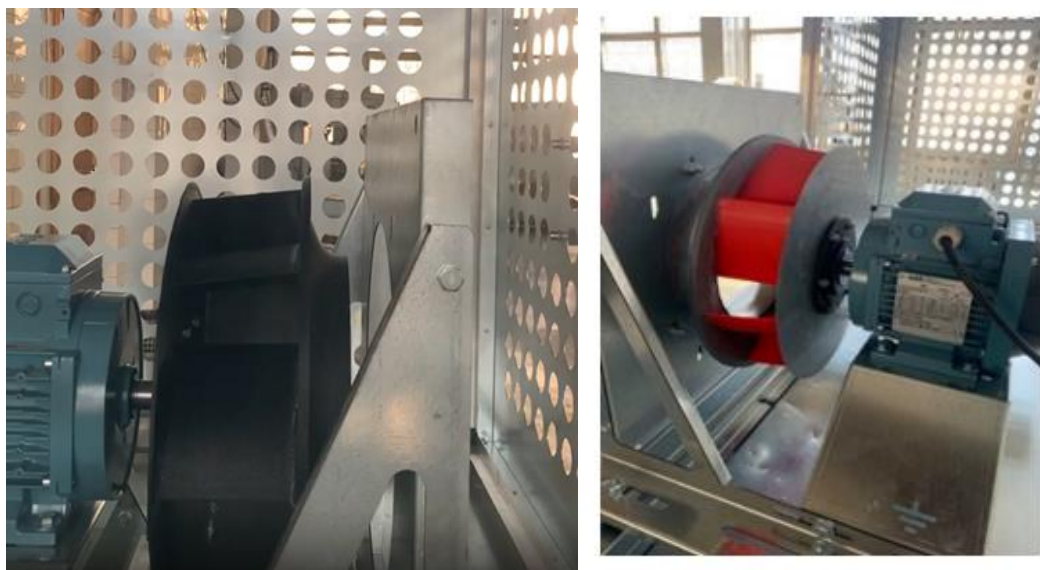
Рисунок 102 – Стенд для испытания макетов рабочего колеса

Количество оборотов электродвигателя устанавливалось в соответствии с таблицей 33.

Таблица 33 – Значение оборотов в соответствии с показателями ПЧ/Гц

Значение Гц на ПЧ	Обороты двигателя (Об/мин)
20	1172
25	1484
30	1792
35	2096
40	2400
45	2706
50	3006
55	3300
60	3606

На рисунке 103 представлено рабочее колесо вентилятора, установленное на специализированном стенде.



а

б

Рисунок 103 – Рабочее колесо вентилятора, изготовленные по двум методам, установлены на специализированном стенде:

а – базовая структура; б –разработанная структура

Рабочее колесо вентилятора нагружалось согласно программе испытаний.

Этапы проведения испытаний:

1. Установка макета рабочего колеса на вал электродвигателя:

- монтаж втулки на ступицу рабочего колеса;
- поочередная и равномерная затяжка винтов в соответствии с рекомендованным моментом затяжки.

2. Проверка направления вращения методом кратковременного включения электродвигателя

3. Постепенное увеличение оборотов электродвигателя до 3000 об/мин за счет увеличения частоты.

Разработанная структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками была использована при выполнении ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. На рисунке 104 представлены изделия различного применения, изготовленные по разработанной структуре конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати.



Рисунок 104 – Примеры деталей из полимерно-композиционных материалов, изготовленных в соответствии с разработанной структурой конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати

Использование разработанной структуры конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати позволило добиться наименьшей материалоемкости при соблюдении технических требований.

## Выводы по главе 5

По результатам работ, проведенных в пятой главе, можно сделать выводы:

1. Разработанная структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками была использована при разработке конструкции и технологии «рабочее колесо вентилятора».

2. Для сравнения рабочее колесо вентилятора изготавливалось по двум методам: с использованием базовой структуры FDM-печати; с использованием разработанной структуры обоснования режимов FDM-печати. В соответствии со структурой конструкторского обоснования для изделия были предложены три варианта конструкции, подобран материал и проведено моделирование напряженно-деформированного состояния. При моделировании были использованы аналитические зависимости эффективных характеристик ортотропного материала при различных значениях степени заполнения, полученные в третьей главе. Расчеты позволили определить оптимальный процент заполнения (60%), позволяющий снизить массу изделия на 50% при соблюдении технических требований. В результате предварительной обработки была выполнена корректировка размеров (на 3,5%) модели с учетом усадки, возникающей при FDM-печати и постобработки.

3. В соответствии со структурой технологического обоснования для изделия были определены рациональные режимы процесса FDM-печати и постобработки, которые позволили увеличить производительность на 70% и уменьшить используемый материал на 50%, при соблюдении технических требований.

4. Проведена оценка прочностных параметров изделия «рабочее колесо вентилятора» экспериментальным методом на специализированном стенде.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача разработки конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками, включающее разработку и оптимизацию конструкций, выбор материалов, определение технологических схем, режимов печати и последующей дополнительной обработки.

Выводы:

1. Проведен анализ современного состояния технологий производства изделий с заданными характеристиками, возможностей и особенностей метода FDM-печати, методов постобработки.

2. Разработана структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати, позволяющая уменьшить материалоемкость изделий при выполнении заданных характеристик, гарантирующих выполнение служебного назначения изделием.

3. Разработан способ определения фактических значений характеристик изделия с использованием методов микромеханики для изотропных и ортотропных моделей, позволяющих определить эффективные значения физико-механических свойств при различных степенях заполнения. В результате математического моделирования получены аналитические зависимости эффективных свойств при различных значениях степени заполнения, позволяющие определить оптимальное заполнение и уменьшить массу изделий до 50% при достижении заданных характеристик.

4. На основании проведенного многофакторного эксперимента по исследованию физико-механических свойств от режимов FDM-печати установлено, что угол наклона раstra, высота слоя температура и скорость печати являются ключевыми параметрами, оказывающими наибольшее влияние на механические свойства и анизотропию образцов. В результате экспериментальных исследований получены нелинейные уравнения регрессии, позволяющие определять рациональные режимы печати, обеспечивающие уменьшению времени печати до

70%, а также уменьшению используемого материала до 50% при достижении заданных характеристик.

5. Проведены экспериментальные исследования влияния постобработки на физико-механические свойства изделий, изготовленных методом FDM-печати. Установлено, что наибольшее влияние на качество поверхности и физико-механические свойства готовых изделий оказывает объемная постобработка – отжиг. Однако при отжиге наблюдаются недопустимые деформации, что в случае конкретного изделия может сделать его непригодным для использования. Установлено, что наиболее перспективными с точки зрения простоты реализации и применимости к реальным изделиям, получаемым FDM-печатью, являются технологии отжига в дисперсной среде. На основе анализа литературы и с учетом результатов экспериментальных исследований сформулированы рекомендации по выбору метода постобработки для реальных изделий, в том числе сложной формы, получаемых FDM-печатью, в зависимости от предъявляемых к ним требований.

6. Разработанная структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками использована при подготовке, печати и постобработке рабочего колеса вентилятора. В соответствии с разработанной структурой оптимизирована конструкция, выбран материал, определены рациональные режимы печати и метод постобработки рабочего колеса вентилятора, что позволило уменьшить материалоемкость на 50%. Изготовленное рабочее колесо вентилятора прошло экспериментальную проверку согласно программе испытаний.

7. Результаты исследований использованы в ООО ИВЕНС при создании инновационных вентиляционных систем и импортозамещения, а также в учебном процессе на кафедре «Электро- и нанотехнологии» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».



**ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

ИПФ	Изделие простой формы
ИСФ	Изделие сложной формы
ЧПУ	Числовое программное управление
КО	Конструкторское обеспечение
ТО	Технологическое обеспечение
КТО	Конструкторско-технологическое обеспечение
АБС	Акрилбутадиенстирол
ПА	Полиамид
ПТФЭ	Политетрафторэтилен
ПЭЭК	Полиэфирэфиркетон
ПФСУ	Полифениленсульфон
ПФС	Полифениленсульфид
ПП	Полипропилен
FDM	Метод послойного наплавления
SLS	Стереолитография
SLA	Селективное лазерное спекание
MJM	Многоструйное моделирование
ПЭИ	Полиэфирэמיד
ПЛА	Полилактид
ПЕТГ	Полиэтилентерефталат
FGF	Метод плавления гранулированного пластика
ПЧ	Преобразователь частоты
ДСК	Дифференциальная сканирующая калориметрия

**ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СТАНДАРТОВ**

ГОСТ 2.101-68	Единая система конструкторской документации. Виды Изделий
ГОСТ 14.201-83	Обеспечение технологичности конструкции изделий
ГОСТ 14.202-73	Правила выбора показателей технологичности конструкции изделий
ГОСТ 1050-74	Сталь углеродистая качественная конструкционная
ГОСТ Р 52857.1-2007	Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность
ГОСТ 11645-2021	Пластмассы. Методы определения показателя текучести расплава термопластов
ГОСТ 11262-2017	Пластмассы. Метод испытания на растяжение
ГОСТ 4784-2019	Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Вороненко В. П., Соломенцев Ю. М., Схиртладзе А. Г. Проектирование машиностроительного производства. – 2006.
2. Воячек А. И., Сенькин В. В. Основы проектирования и конструирования машин. – 2008.
3. Овсянников В. Е., Шпитко Г. Н. Основы проектирования и конструирования машин. – 2012.
4. Авлукова Ю. Основы автоматизированного проектирования. – Litres, 2016.
5. Беляков Н. В. и др. Научные основы технологии машиностроения. – 2021.
6. Беляков Н. В. и др. Научные основы технологии машиностроения. – 2021.
7. Аввакумов Е. и др. (ред.). Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий. – Litres, 2022.
8. Грубый С. Математическое моделирование и оптимизация механической обработки. – Litres, 2022.
9. Чуваков А. Основы подготовки технологических операций на обрабатывающих станках с чпу. Учебник для вузов. – Litres, 2021.
10. Tapie L., Mawussi B., Bernard A. Topological model for machining of parts with complex shapes //Computers in Industry. – 2012. – Т. 63. – №. 5. – С. 528-541.
11. Афанасьева А. С., Ваганова Е. С. Способы переработки термопластичных полимеров //Экология и циклическая экономика. – 2022. – С. 47-49.
12. Шерышев М., Шерышев А. Технология переработки пластмасс. Современные особенности технологии термоформования. Учебное пособие для вузов. – Litres, 2021.
13. Шерышев М. Технология переработки полимеров: изделия из полимерных листов и пленок 2-е изд., испр. и доп. Учебное пособие для вузов. – Litres, 2020.
14. Полимерные композиционные материалы: учебное пособие. Часть 2 / сост. Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 130 с.

15. Кулик, В.И. Технология композитов на основе термореактивных полимерных связующих: учебное пособие / В.И. Кулик, А.С. Нилов; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2019. 136 с
16. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие. Изд. перераб. / под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2009. 560 с.
17. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для вузов / В.Б. Арзамасов и др. М.: Академия, 2009. 447 с.
18. Холодников Ю.В. Способы изготовления изделий из композитов //Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – №. 6-2. – С. 214-221.
19. Власов А. Ю., Пасечник К. А., Мартынов В. А. Конструкторско-технологические аспекты создания прецизионных изделий сложной формы из полимерных композиционных материалов //Сибирский аэрокосмический журнал. – 2016. – Т. 17. – №. 2. – С. 460-465.
20. Сорокин А. Е. и др. Технологии получения полимерных композиционных материалов на основе термопластичной матрицы (обзор) //Труды ВИАМ. – 2021. – №. 3 (97). – С. 78-86.
21. Амиров С. С. Дефекты при изготовлении продукции методом литья под давлением пластмасс (обзор) //Автомобили, транспортные системы и процессы: настоящее, прошлое и будущее. – 2021. – С. 26-28.
22. Бычкова Е. В., Борисова Н. В., Панова Л. Г. Технология переработки полимеров методами прессования и литья под давлением. – 2021.
23. Бышов Н. В., Кравченко А. М., Борычев С. Н. Основы инженерного проектирования. – 2010.
24. Дунаев П. Ф., Леликов О. П. Конструирование узлов и деталей машин. – Академия, 2009.
25. Детали машин: Учебник. / Под ред. О.А. Ряховского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004.

26. Жикин Н. Д. Совершенствование конструкторской подготовки производства. – 2023.
27. Назаревич С. А. ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОДУКЦИИ.
28. Лазарев Б. Н., Кобзев В. В. Особенности технологической подготовки на этапе развития предприятия мелкосерийного и единичного производства в машиностроительной отрасли //Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли. – 2021. – С. 198-202.
29. Медведева С. А. Основы технической подготовки производства/Учебное пособие //СПб: СПбГУ ИТМО. – 2010. – С. 5.
30. Левкин Г. Г. и др. Организация производства. – ООО ДиректМедиа, 2024.
31. Чуваков А. Основы подготовки технологических операций на обрабатывающих станках с чпу. Учебник для вузов. – Litres, 2021.
32. ГОСТ Р 57558-2017. Национальный стандарт Российской Федерации, Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы – часть 1. Термины и определения. Стандартиформ, Москва, 2018, 16 с.
33. Баксанова Ю. А., Максимов П. В. Обзор методов аддитивного формирования изделий //Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – №. 9-2 (51). – С. 6-9.
34. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Т. 83. – С. 389-405.
35. Bhatia A., Sehgal A. K. Additive manufacturing materials, methods and applications: A review //Materials Today: Proceedings. – 2023. – Т. 81. – С. 1060-1067.
36. Kristiawan R. B. et al. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters //Open Engineering. – 2021. – Т. 11. – №. 1. – С. 639-649.
37. Kumar S. et al. A comprehensive review of FDM printing in sensor applications: Advancements and future perspectives //Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Т. 113. – С. 152-170.

38. Salenko, A.F. Creation of sealed strong structures of rocket and space equipment FDM printing methods by ULTEM™ 9085 PEI plastic / A.F.Salenko, I.I. Derevianko, A.A.Samusenko, K.V.Avramov, A.V. Lithot, V.V. Rogulin // Mech. Adv. Technol. – 2021. – Vol. 5. – № 3. – PP. 282–293.
39. Zirak N. et al. Toward polymeric and polymer composites impeller fabrication //Polymers. – 2021. – Т. 14. – №. 1. – С. 97.
40. Aloyaydi B., Sivasankaran S., Mustafa A. Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid //Polymer Testing. – 2020. – Т. 87. – С. 106557.
41. Хаширов А. С. Влияние технологических режимов FDM-печати на свойства изделий из полифениленсульфона и его композита с дискретным углеродным волокном : дисс. – Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 2019.
42. Potapov A. A. et al. Supplementary treatment of FDM printed parts. Review //Uspekhi Khimii. – 2024. – Т. 93. – №. 9. – С. 1-21.
43. Ashby M. F., Shercliff H., Cebon D. Materials: engineering, science, processing and design. – Butterworth-Heinemann, 2018.
44. Kutz M. (ed.). Handbook of materials selection. – John Wiley & Sons, 2002.
45. Lachmayer R., Bode B., Kaierle S. (ed.). Innovative Product Development by Additive Manufacturing 2021. – Springer Nature, 2022.
46. Zanetti E. M. et al. Additively manufactured custom load-bearing implantable devices: grounds for caution //Australasian Medical Journal (Online). – 2017. – Т. 10. – №. 8. – С. 694.
47. Ambu R., Motta A., Calì M. Design of a customized neck orthosis for FDM manufacturing with a new sustainable bio-composite //Design Tools and Methods in Industrial Engineering: Proceedings of the International Conference on Design Tools and Methods in Industrial Engineering, ADM 2019, September 9–10, 2019, Modena, Italy. – Springer International Publishing, 2020. – С. 707-718.
48. Zhang Y. et al. Evaluating the design for additive manufacturing: a process planning perspective //Procedia Cirp. – 2014. – Т. 21. – С. 144-150.

49. Medellín-Castillo H. I., Zaragoza-Siqueiros J. Design and manufacturing strategies for fused deposition modelling in additive manufacturing: a review //Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2019. – Т. 32. – №. 1. – С. 1-16.
50. Wang L., Gramlich W. M., Gardner D. J. Improving the impact strength of Poly (lactic acid)(PLA) in fused layer modeling (FLM) //Polymer. – 2017. – Т. 114. – С. 242-248.
51. Yang L. et al. Design for additively manufactured lightweight structure: a perspective. – 2016.
52. Roger F., Krawczak P. 3D-printing of thermoplastic structures by FDM using heterogeneous infill and multi-materials: An integrated design-advanced manufacturing approach for factories of the future //CFM 2015-22ème Congrès Français de Mécanique. – AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie, 2015.
53. Feng J. et al. A review of the design methods of complex topology structures for 3D printing //Visual computing for industry, biomedicine, and art. – 2018. – Т. 1. – С. 1-16.
54. Orme M. et al. Topology optimization for additive manufacturing as an enabler for light weight flight hardware //Designs. – 2018. – Т. 2. – №. 4. – С. 51.
55. Suresh K. Efficient microstructural design for additive manufacturing //International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. – American Society of Mechanical Engineers, 2014. – Т. 46285. – С. V01AT02A045.
56. García-Dominguez A., Claver J., Sebastián M. A. Integration of additive manufacturing, parametric design, and optimization of parts obtained by fused deposition modeling (FDM). A methodological approach //Polymers. – 2020. – Т. 12. – №. 9. – С. 1993.
57. Huang J. et al. A survey of design methods for material extrusion polymer 3D printing //Virtual and Physical Prototyping. – 2020. – Т. 15. – №. 2. – С. 148-162.
58. Димитриенко Ю. И., Соколов А. П. Метод конечных элементов для решения локальных задач механики композиционных материалов //М.: Изд-во МГТУ им. НЭ Баумана. – 2010. – Т. 66.

59. Wan L. et al. Computational micromechanics-based prediction of the failure of UD composite lamina subjected to transverse and in-plane shear stress states //Journal of Composite Materials. – 2020.
60. Kundalwal S. I. Review on micromechanics of nano-and micro-fiber reinforced composites //Polymer composites. – 2018. – Т. 39. – №. 12. – С. 4243-4274.
61. Aboudi J., Arnold S. M., Bednarczyk B. A. Practical micromechanics of composite materials. – Butterworth-Heinemann, 2021.
62. Муйземнек А. Ю., Иванова Т. Н., Карташова Е. Д. Сопоставление результатов экспериментального и расчетного определения эффективных характеристики упругих свойств полимерных слоистых композитов из углей стеклотканей //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021. – №. 2. – С. 88-105.
63. Этьен Х., Тимирязев В. А. Использование аддитивных технологий для изготовления деталей машин //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – №. 11. – С. 136-144.
64. Литунов С. Н. и др. Обзор и анализ аддитивных технологий. Часть 2 //Омский научный вестник. – 2016. – №. 5 (149). – С. 20-24.
65. Сокольников В. В., Андрюхина Д. С., Зиновкина Д. А. Анализ аддитивных технологий //Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – 2023. – №. 3. – С. 610-622.
66. Шарафутдинов А. Р., Нагайцев Д. В., Шмаков А. Д. Обзор аддитивных технологий в контексте сравнительного анализа с традиционными методиками получения изделий сложных форм позаказной специализации. Международный научный журнал "Флагман науки" №11(11) // DOI 10.37539/2949-1991.2023.11.11.040 - 2023 - №11 – С. 150-153.
67. Braconnier D. J., Jensen R. E., Peterson A. M. Processing parameter correlations in material extrusion additive manufacturing //Additive Manufacturing. – 2020. – Т. 31. – С. 100924.



68. Orme M. E. et al. Designing for additive manufacturing: lightweighting through topology optimization enables lunar spacecraft //Journal of Mechanical Design. – 2017. – T. 139. – №. 10. – C. 100905.

69. Rodríguez-Panes A., Claver J., Camacho A. M. The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: A comparative analysis //Materials. – 2018. – T. 11. – №. 8. – C. 1333.

70. Ziemian C., Sharma M., Ziemian S. Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling //Mechanical engineering. – 2012. – T. 23. – C. 159-180.

71. Syrlybayev D. et al. Optimisation of strength properties of FDM printed parts— A critical review //Polymers. – 2021. – T. 13. – №. 10. – C. 1587.

72. Shanmugam V. et al. Fused deposition modeling based polymeric materials and their performance: A review //Polymer Composites. – 2021. – T. 42. – №. 11. – C. 5656-5677.

73. Fernandez-Vicente M. et al. Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing //3D printing and additive manufacturing. – 2016. – T. 3. – №. 3. – C. 183-192.

74. Dey A., Yodo N. A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics //Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2019. – T. 3. – №. 3. – C. 64.

75. Ahn, S. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS / Ahn, S., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. and Wright, P.K. // Rapid Prototyping Journal. – 2002. – V.8. – №.4. – P. 248-257.

76. Samykano, M. Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters / M. Samykano, S. K. Selvamani, K. Kadirgama, W. K. Ngui, G. Kanagaraj, K. Sudhakar //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – V. 102. – P. 2779-2796.

77. Chin Ang, K. Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures / K. Chin Ang,

K. Fai Leong, C. Kai Chua, M. Chandrasekaran //Rapid Prototyping Journal. – 2006. – V. 12. – №. 2. – P. 100-105.

78. Rayegani, F. Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE) / F. Rayegani, G. C. Onwubolu //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – V. 73. – P. 509-519.

79. Sood, A. K. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts / A. K. Sood, R. K. Ohdar, S. S. Mahapatra // Materials & Design. – 2010. – V. 31. – №. 1. – P. 287-295.

80. Domingo-Espin, M. Fatigue performance of ABS specimens obtained by fused filament fabrication / M. Domingo-Espin, J. A. Travieso-Rodriguez, R. Jerez-Mesa, J. Lluma-Fuentes //Materials. – 2018. – V. 11. – №. 12. – P. 2521.

81. Percoco, G. Compressive properties of FDM rapid prototypes treated with a low cost chemical finishing / G. Percoco, F. Lavecchia, L. M. Galantucci // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2012. – V. 4. – №. 19. – P. 3838-3842.

82. Afrose, M. F. Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material / M. F. Afrose, S. H. Masood, P. Iovenitti, M. Nikzad, I. Sbarski //Progress in Additive Manufacturing. – 2016. – V. 1. – P. 21-28.

83. Moradi, M. 3D printed parts with honeycomb internal pattern by fused deposition modelling; experimental characterization and production optimization / M. Moradi, S. Meibadi, A. Kaplan //Metals and Materials International. – 2019. – V. 25. – P. 1312-1325.

84. Deshwal, S. Exercising hybrid statistical tools GA-RSM, GA-ANN and GA-ANFIS to optimize FDM process parameters for tensile strength improvement / S. Deshwal, A. Kumar, D. Chhabra//CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2020. – V. 31. – P. 189-199.

85. Akhoundi, B. An experimental study of nozzle temperature and heat treatment (annealing) effects on mechanical properties of high-temperature polylactic acid in fused

deposition modeling / B. Akhoundi, M. Nabipour, F. Hajami, D. Shakoori //Polymer Engineering & Science. – 2020. – V. 60. – №. 5. – P. 979-987.

86. Aloyaydi, B. Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid / B. Aloyaydi, S. Sivasankaran, A. Mustafa //Polymer Testing. – 2020. – V. 87. – P. 106557.

87. Yang, L. Experimental investigations for optimizing the extrusion parameters on FDM PLA printed parts / L. Yang, S. Li, Y. Li, M. Yang, Q. Yuan //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2019. – V. 28. – P. 169-182.

88. Wang, P. Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK / P. Wang, B. Zou, H. Xiao, S. Ding, C.Huang //Journal of Materials Processing Technology. – 2019. – V. 271. – P. 62-74.

89. Rajpurohit, S. R. Effect of process parameters on tensile strength of FDM printed PLA part / S. R. Rajpurohit, H. K. Dave //Rapid Prototyping Journal. – 2018. – V.24. - №.8. – P. 1317-1324.

90. Ziemian, C. Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modeling / C. Ziemian, M. Sharma, S. Ziemian //Mechanical engineering. –2012. – V.23. – P.159-180.

91. Wu, W. Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS / W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, J. Zhao //Materials. – 2015. – V. 8. – №. 9. – P. 5834-5846.

92. Ding, S. Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM / S. Ding, B. Zou, P. Wang, H. Ding//Polymer Testing. – 2019. – V. 78. – P. 105948.

93. El Magri, A. Optimization of printing parameters for improvement of mechanical and thermal performances of 3D printed poly (ether ether ketone) parts / A. El Magri, K. El Mabrouk, S. Vaudreuil, H. Chibane, M. E. Touhami //Journal of Applied Polymer Science. – 2020. – V. 137. – №. 37. – P. 49087.

94. Srinivasan, R. Effect on infill density on mechanical properties of PETG part fabricated by fused deposition modeling / R. Srinivasan, W. Ruban, A. Deepanraj, R. Bhuvanesh, T. Bhuvanesh //Materials Today: Proceedings. – 2020. – V. 27. – P. 1838-1842.
95. Es-Said, O. S. Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples / Es- O. S. Said, J. Foyos, R. Noorani, M. Mendelson, R. Marloth, B. A. Pregger //Materials and Manufacturing Processes. – 2000. – V. 15. – №. 1. – P. 107-122.
96. Lluch-Cerezo, J. Effect of a powder mould in the post-process thermal treatment of ABS parts manufactured with FDM technology / J. Lluch-Cerezo, R. Benavente, M. D. Meseguer, J. A. García-Manrique //Polymers. – 2021. – V.13. – №.15. – P. 2422.
97. Kartal F., Kaptan A. Effects of annealing temperature and duration on mechanical properties of PLA plastics produced by 3D Printing //European Mechanical Science. – T. 7. – №. 3. – C. 152-159.
98. Khan H. M., Özer G., Yilmaz M. S. Post-Processing in Additive Manufacturing: Requirements, Theories, and Methods //Handbook of Post-Processing in Additive Manufacturing. – CRC Press, 2023. – C. 63-86.
99. Yadav P. et al. Binder jetting 3D printing of titanium aluminides based materials: a feasibility study //Advanced Engineering Materials. – 2020. – T. 22. – №. 9. – C. 2000408.
100. Nguyen P. Q. K. et al. Influences of printing parameters on mechanical properties of recycled PET and PETG using fused granular fabrication technique //Polymer Testing. – 2024. – T. 132. – C. 108390.
101. Mathew A. et al. Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts //Progress in Additive Manufacturing. – 2023. – T. 8. – №. 6. – C. 1161-1178.

102. Jayakumar N., Arumugam H., Albert Selvaraj A. D. Mechanical behaviour of the post processed 3D printed PLA parts using polar and non-polar solvents //Polymer Bulletin. – 2024. – T. 81. – №. 5. – C. 4257-4274.
103. Alsoufi M. S. et al. From 3D models to FDM 3D prints: Experimental study of chemical treatment to reduce stairs-stepping of semi-sphere profile //AIMS Mater. Sci. – 2019. – T. 6. – №. 6. – C. 1086-1106.
104. Singh R. et al. Investigation for surface finish improvement of FDM parts by vapor smoothing process //Composites Part B: Engineering. – 2017. – T. 111. – C. 228-234.
105. Mushtaq R. T. et al. A post-processing laser polishing method to improve process performance of 3D printed new Industrial Nylon-6 polymer //Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – T. 101. – C. 546-560.
106. Moradi M. et al. Post-processing of FDM 3D-printed polylactic acid parts by laser beam cutting //Polymers. – 2020. – T. 12. – №. 3. – C. 550.
107. Mayville, P.J.; Petsiuk, A.L.; Pearce, J.M. Thermal Post-Processing of 3D Printed Polypropylene Parts for Vacuum Systems. J. Manuf. Mater. Process. 2022, 6, 98.
108. Gao X. et al. Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond //Additive Manufacturing. – 2021. – T. 37. – C. 101658.
109. Yang F., Pitchumani R. Healing of thermoplastic polymers at an interface under nonisothermal conditions //Macromolecules. – 2002. – T. 35. – №. 8. – C. 3213-3224.
110. Cao L. et al. Effect of post-process treatments on mechanical properties and surface characteristics of 3D printed short glass fiber reinforced PLA/TPU using the FDM process //CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2023. – T. 41. – C. 135-143.
111. Safari F., Kami A., Abedini V. 3D printing of continuous fiber reinforced composites: A review of the processing, pre-and post-processing effects on mechanical properties //Polymers and Polymer Composites. – 2022. – T. 30. – C. 09673911221098734.

112. Gu S. et al. Effect of heat treatment on the performance of 3D printed thermoplastic polyurethane flexible substrates //Journal of Applied Polymer Science. – 2023. – T. 140. – №. 16. – C. e53741.

113. Pazhamannil R. V. et al. Thermal post-processing effects on the polycarbonate acrylonitrile butadiene styrene composites manufactured by fused filament fabrication //Polymer Engineering & Science. – 2023. – T. 63. – №. 4. – C. 1184-1194.

114. Lluch-Cerezo, J. Influence of Thermal Annealing Temperatures on Powder Mould Effectiveness to Avoid Deformations in ABS and PLA 3D-Printed Parts / J. Lluch-Cerezo, M. D. Meseguer, J. A. García-Manrique, R. Benavente // Polymers. – 2022. – V.14. – №.13. – P. 2607.

115. Seok W., Jeon E., Kim Y. Effects of Annealing for Strength Enhancement of FDM 3D-Printed ABS Reinforced with Recycled Carbon Fiber //Polymers. – 2023. – T. 15. – №. 14. – C. 3110.

116. Stojković J. R. et al. An Experimental Study on the Impact of Layer Height and Annealing Parameters on the Tensile Strength and Dimensional Accuracy of FDM 3D Printed Parts //Materials. – 2023. – T. 16. – №. 13. – C. 4574

117. Valvez S., Reis P. N. B., Ferreira J. A. M. Effect of annealing treatment on mechanical properties of 3D-Printed composites //Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – T. 23. – C. 2101-2115.

118. Singh, S. U. Effect of annealing on surface roughness of additively manufactured plastic parts: A case study / S. U. Singh, R. U. Singh //Proceedings of the National Conference on Production Engineering (COPE-2016), Guru Nanak Dev Engineering college, Ludhiana, India. – 2016. – P. 7-8.

119. Butt, J. Investigating the effects of annealing on the mechanical properties of FFF-printed thermoplastics / J. Butt, R. Bhaskar //Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2020. – V.4. – №2. –P. 38.

120. Slavković, V. Influence of annealing and printing directions on mechanical properties of PLA shape memory polymer produced by fused deposition modeling / V. Slavković, N. Grujović, A. Dišić, A. Radovanović // Proceedings of the 6th

International Congress of Serbian Society of Mechanics Mountain Tara. – 2017. – P.19-21.

121. Singh, S. Optimization and reliability analysis to improve surface quality and mechanical characteristics of heat-treated fused filament fabricated parts / S. Singh, M. Singh, C. Prakash, M. K. Gupta, M. Mia, R. Singh //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – V. 102. – P. 1521-1536.

122. Evan M. et al. The Influence of Annealing Temperature and Holding Time Near Glass Transition Temperature on the Tensile Strength of Fused Deposition Modeling Printed Polylactic Acid //Jurnal Polimesin. – 2023. – T. 21. – №. 1. – C. 25-28.

123. Lyu Y. et al. Effects of thermal process conditions on crystallinity and mechanical properties in material extrusion additive manufacturing of discontinuous carbon fibre reinforced polyphenylene sulphide composites //Journal of Composite Materials. – 2023. – C. 00219983231194391.

124. Kumar, S. Other solid deposition processes / S. Kumar, S. Kumar //Additive Manufacturing Processes. – 2020. – P. 111-130.

125. Beniak, J. Research on parameters optimization for the Additive Manufacturing process / J. Beniak, M. Holdy, P. Križan, M. Matúš //Transportation Research Procedia. – 2019. – V. 40. – P. 144-149.

126. Wach, R.A. Enhancement of mechanical properties of FDM-PLA parts via thermal annealing / R.A. Wach, P. Wolszczak, A. Adamus-Włodarczyk //Macromolecular Materials and Engineering. – 2018. – V.303. – P.1800169.

127. Ravi A. K., Deshpande A., Hsu K. H. An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing //Journal of Manufacturing Processes. – 2016. – T. 24. – C. 179-185.

128. Kiendl, J. Controlling toughness and strength of FDM 3D-printed PLA components through the raster layout / J. Kiendl, C. Gao //Composites Part B: Engineering. – 2020. – V. 180. – P. 107562.

129. Gao, W. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering / W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C. B. Williams, P. D. Zavattieri // *Computer-Aided Design*. – 2015. – V. 69. – P. 65-89.

130. Khosravani, M.R. On the post-processing of 3d-printed abs parts / M. R. Khosravani, J. Schüürmann, F. Berto, T. Reinicke // *Polymers*. – 2021. – V.13. – №10. – P. 1559.

131. Kuo, C. C. A surface quality improvement apparatus for ABS parts fabricated by additive manufacturing / C. C. Kuo, C. W. Wang, Y. F. Lee, Y. L. Liu, Q. Y. Qiu // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – V. 89. – P. 635-642.

132. Wickramasinghe, S. FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments / S. Wickramasinghe, T. Do, P. Tran // *Polymers*. – 2020. – V. 12. – №. 7. – P. 1529.

133. Dizon, J. R. C. Post-processing of 3D-printed polymers / J. R. C. Dizon, C. C. L. Gache, H. M. S. Cascolan, L. T. Cancino, R. C. Advincula // *Technologies*. – 2021. – V. 9. – №. 3. – P. 61.

134. Popescu, D. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review / D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baciu, R. Marinescu // *Polymer Testing*. – 2018. – V. 69. – P. 157-166.

135. Kohn, O. Fused Filament Fabrication Additive Manufacturing: Mechanical Response of Polyethylene Terephthalate Glycol / O. Kohn, Y. Rosenthal, D. Ashkenazi, R. Shneck, A. Stern // *Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati. Fascicle XII, Welding Equipment and Technology*. – 2021. – V.32. P. 47-55.

136. Malagutti, L. A Post-Processing Method for Improving the Mechanical Properties of Fused-Filament-Fabricated 3D-Printed Parts / L. Malagutti, G. Ronconi, M. Zanelli, F. Mollica, V. Mazzanti // *Processes*. – 2022. – V.10. – №.11. – P. 2399.

137. Amza, C. G. Enhancing mechanical properties of polymer 3D printed parts / C. G. Amza, A. Zapciu, G. Constantin, F. Baciu, M. I. Vasile // *Polymers*. – 2021. – V. 13. – №. 4. – P. 562.



138. Vorkapić, M. Enhancing mechanical properties of 3D printed thermoplastic polymers by annealing in moulds / M. Vorkapić, I. Mladenović, T. Ivanov, A. Kovačević, M. S. Hasan, A. Simonović, I. Trajković //Advances in Mechanical Engineering. – 2022. – V. 14. – №. 8. – P. 16878132221120737.

139. Yu W. et al. The effects of thermal annealing on the performance of material extrusion 3D printed polymer parts //Materials & Design. – 2023. – Т. 226. – С. 111687.

140. Moczadlo M. et al. On the 3D printing of polypropylene and post-processing optimization of thermomechanical properties //MRS Communications. – 2023. – Т. 13. – №. 1. – С. 169-176.

141. Антипов Д. В. и др. Ронструкторско-технологические решения аддитивного производства корпусных деталей МКА НК //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2023. – Т. 25. – №. 4 (114). – С. 104-109.

142. Смоляный С. И., Елдулов Ю. В. Основные проблемы и направления совершенствования конструкторско-технологической подготовки машиностроительного производства на предприятиях РКП //Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т. 3. – №. 13. – С. 134-135.

143. Krotiouk Y. M., Kuznechik O. O., Tkachenko V. V. Information support for design and technological preparation for additive manufacturing: cyber-physical approach //Problemy Fiziki, Matematiki i Tekhniki (Problems of Physics, Mathematics and Technics). – 2021. – №. 1. – С. 79-92.

144. ГОСТ 59037-2020. Национальный стандарт Российской Федерации, Аддитивные технологии. Конструирование металлических изделий. Руководящие принципы. Стандартиформ, Москва, 2020, 8 с.

145. Новоженев В.А., Стручева Н.Е. Термический анализ. Москва: Юрайт. 2023. 440 с.

146. ГОСТ Р 55134-2012 Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 1. Общие принципы. М.: Стандартиформ. 2014. 27 с.

147. ГОСТ Р 55135-2012 Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 2. Определение температуры стеклования. М.: Стандартиформ. 2014. 8 с.

148. ГОСТ Р 56724-2015\_Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 3. Определение температуры и энтальпии плавления и кристаллизации. М.: Стандартиформ. 2016. 7 с.

149. Свид. 2024664175 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа для математической обработки данных дифференциальной сканирующей калориметрии / В.М. Волгин, А.П. Малахо, А.А. Потапов, П.Э. Калиш, И.Н. Фомичева; заявитель и правообладатель: ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (ТулГУ). – № 2024662716; заявл. 04.06.2024; опубл. 18.06.2024, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

150. Dave H. K., Davim J. P. (ed.). Fused deposition modeling based 3D printing. – Cham : Springer International Publishing, 2021.

151. Говоров И.С., Потапов А.А., Веневцев А.Ю. Исследование физико-механических свойств образцов после FDM- печати // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула. ТулГУ. 2023. Вып.11. С.446-450.

152. Slonov A, Musov I, Zhansitov A, Khashirov A, Tlupov A, Musov K, Rzhetskaya E, Fomicheva I, Potapov A, Khashirova S. Investigation of the Properties of Polyethylene and Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer Blends for 3D Printing Applications // Polymers. 2023. V.15(20). P.4129. DOI: 10.3390/polym15204129.

153. Осипов П.Н., Потапов А.А., Говоров И.С. Влияние технологических режимов FDM-печати на свойства образцов из полиэфиримида / Передовые инженерные школы: материалы, технологии, конструкции: материалы I МНПК молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Пермь, 19–20 декабря 2023 г. - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2024. С. 207-210.

154. Гнидина И.В., Волгин В.М., Малахо А.П., Потапов А.А. Влияние постобработки на физико-механические свойства образцов, полученных методом

FDM-печати // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула. ТулГУ. 2023. Вып.9. С.326-334.

155. Potapov A, Malakho A., Gnidina I., Volgin V. Post-treatment of ABS samples manufactured by FDM // E3S Web of Conferences. 2023. V.458. Art.02010. DOI: 10.1051/e3sconf/20234580201.

156. Potapov A.A., Malakho A.P., Gnidina I.V., Volgin V.M. Bulk post-treatment of FDM-printed samples // Proc. SPIE, Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023). 2024. V. 12986. Art. 1298604. DOI: 10.1117/12.3016485.

157. Потапов А.А., Малахо А.П., Гнидина И.В., Волгин В.М. Термическая постобработка образцов, изготовленных методом FDM-печати. Новые полимерные композиционные материалы. Микитаевские чтения. Материалы XVIII МНТК. Нальчик: Издательство «Принт Центр», 2023. С 95.

158. Потапов А.А., Малахо А.П., Гнидина И.В., Волгин В.М. Постобработка образцов после FDM-печати // Вестник Тульского государственного университета. Проблемы и перспективы развития автоматизации технологических процессов. Тула: Изд-во ТулГУ. С 129-136.

159. Потапов А.А., Осипов П.Н., Говоров И.С. Постобработка образцов, изготовленных методом FDM / Передовые инженерные школы: материалы, технологии, конструкции: материалы I МНПК молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Пермь, 19–20 декабря 2023 г. - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2024. С. 236-238.

160. Потапов А.А., Гнидина И.В., Курочкин. Комбинированная термическая постобработка образцов из АБС пластика, изготовленных методом FDM-печати / Научные технологии в машиностроении: сб. тезисов РНТК, г. Тула, 12 декабря 2023 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. С 99-103.

161. Potapov A.A., Volgin V.M., Malakho A.P., Gnidina I.V. Supplementary treatment of FDM printed parts. Review // Russ. Chem. Rev. 2024. V.93(9). Art. RCR5127. DOI: 10.59761/RCR5127.



АКТ

УТВЕРЖДАЮ

Директор по учебной работе ТулГУ

д-р техн. наук. Доцент

В.В. Котов

«25» 09 2024г.

Об использовании научных положений и результатов кандидатской диссертации Потапова Андрея Алексеевича на тему: «Конструкторско-технологическое обоснование режимов FDM-печати с заданными характеристиками» в учебном процессе Тульского государственного университета

Комиссия в составе начальника учебно-методического управления, канд. тех. наук, А.В. Моржова, и.о. заведующего кафедры «Электро- и нанотехнологии», канд. тех. наук, доц. И.В. Гнидиной составила настоящий акт в том, что научные положения и результаты диссертационной работы Потапова Андрея Алексеевича:

- Результаты исследований аналитическим методом относительных характеристик изотропного и ортотропного материала при разной степени заполнения и установленные результирующие аналитические зависимости.

- Установленные путем проведения планируемого многофакторного эксперимента закономерности влияния параметров FDM-печати на физикомеханические свойства.

- Полученные и статически обоснованы соответствующие уравнения регрессии позволяющие определить оптимальные параметры FDM-печати в зависимости от технических требований к изделию.

- Результаты экспериментальных исследований влияния постобработки на физико-механические свойства изделий, изготовленных методом FDM-печати.

- Разработанное конструкторско-технологическое обоснование режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками, позволяющее значительно уменьшить массу изделия без потери прочности и жесткости, а также сократить время изготовления.

Реализованы в образовательный процесс по направлению 15.04.01 «Машины и технологии композиционных и функциональных материалов» по следующим дисциплинам: «Аддитивные технологии», «Проектирование технологической оснастки и инструмента для изготовления изделий из композиционных материалов», «Технология производства технологической оснастки и инструмента для изготовления изделий из композиционных материалов» в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Начальник учебно-методического  
управления, канд. тех. наук. доц.

А.В. Моржов

И.о. зав. каф. ЭиНТ, канд. тех. наук. доц.

И.В. Гнидина

**Общество с ограниченной ответственностью «ИВЕНС»**

129327, г. Москва, ул. Ленская, д.2/21, пом.1/1П

ИНН 7716838332 КПП 771601001 ОГРН 5167746281511

Настоящим подтверждаем, что результаты выполненных, в соответствии с договором, федеральным государственным бюджетным образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ) опытно-технологических работ на тему: «Разработка технологии производства рабочего колеса вентиляционных систем из неметаллических материалов» приняты для использования при создании инновационных вентиляционных систем и импортозамещения отдельных элементов, используемых в вентиляции.

Генеральный директор



Иванов А.В.