

*На правах рукописи*



**Потапов Андрей Алексеевич**

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

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Тула 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет».

Научный руководитель:

**Волгин Владимир Мирович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

**Цобкалло Екатерина Сергеевна**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
государственный университет  
промышленных технологий и  
дизайна» (г. Санкт-Петербург),  
заведующая кафедрой «Инженерное  
материаловедение и метрология»;  
**Баурова Наталья Ивановна**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Московский  
автомобильно-дорожный  
государственный технический  
университет (МАДИ)» (г. Москва),  
декан факультета дорожных и  
технологических машин.  
**ФГАОУ ВО «Московский  
политехнический университет»**  
(г. Москва)

Ведущая организация:

**ФГАОУ ВО «Московский  
политехнический университет»**  
(г. Москва)

Защита диссертации состоится «25» февраля 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.417.01, созданного на федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», по адресу: 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92, учебный корпус 9, ауд. 101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:

<https://tulsu.ru/science/dissertation/diss-24-2-417-01/potapov-aa-24-2-417-01>

Автореферат разослан «20» декабря 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Анцев Александр Витальевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.**

В настоящее время существует необходимость в изделиях сложной формы, традиционные технологии изготовления которых характеризуются многооперационностью, низкой эффективностью и большой материалоемкостью. Современные методы производства, такие как литье, обработка давлением, методы механической обработки и т.д., имеют ряд существенных ограничений, особенно при производстве элементов изделий с заданными характеристиками. Это приводит к значительному 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: аэрокосмической промышленности, автомобилестроении, производстве по индивидуальным заказам в биомеханике и т.д. Среди известных на сегодняшний день методов 3D-печати метод FDM (Fused-Deposition Modeling) является самым популярным в мире. FDM-печать позволяет изготавливать изделия с разной степенью заполнения, тем самым варьируя массу изделия и его 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 также 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 зависимости 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.

**Достоверность результатов** обеспечена корректностью постановки задач, обоснованном использованием теоретических зависимостей, использованием современных методов компьютерного моделирования мирового уровня, а также практическим использованием результатов на предприятиях.

**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 разработке структуры 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 параметры 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 с заданными характеристиками, 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 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 использовались 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».

**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 параметры 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 «Наукоемкие технологии в машиностроении» (Москва, 2023 г.); РНТК «Наукоемкие технологии в машиностроении» (Тула, 2023 г.); I МНПК молодых ученых, аспирантов и студентов «Передовые инженерные школы: материалы, технологии, конструкции» (Пермь, 2023 г.); III МНПК «Материаловедение, строительство, энергетика, технологии и инжиниринг» ЕЕА-III-2024 (Казань, 2024 г.).

**Публикации результатов.** По материалам диссертации опубликованы 14 научных 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; получены 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, направленной на решение важной научно-технической задачи – разработка конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками. Сформулированы цели и задачи диссертационных исследований.

**В первой главе** проведен анализ особенностей конструкторско-технологического обеспечения изделий, получаемых традиционными методами. По результатам сравнения традиционных технологий производства с аддитивными сделан вывод, что аддитивные технологии ввиду специфики процесса имеют ряд преимуществ, дающих возможность провести оптимизацию изделий с заданными характеристиками и при этом обеспечить рентабельность производства и соответствие техническим требованиям. Сравнение технологий аддитивного производства позволило сделать вывод, что FDM-печать является наиболее подходящей по соотношению возможностей и доступности для производства изделий с заданными характеристиками, поскольку позволяет изготовить изделие целиком или по частям для последующей сборки, а также осуществлять печать при разной степени заполнения, что обеспечивает уменьшение массы изделия с сохранением физико-механических свойств. Анализ литературы показал, что существующие модели оценки эффективных упругих характеристик изделий, полученных FDM-печатью, могут быть с удовлетворительной степенью точности использованы только при больших степенях заполнения, что ограничивает возможности по уменьшению массы изделий. Анализ современных исследований о влиянии параметров процесса FDM-печати на физико-механические характеристики готового изделия показал, что не существует универсальных методик, позволяющих обеспечить эффективность применения данного метода при изготовлении изделий с

заданными характеристиками. Анализ исследований в области постобработки образцов, изготовленных методом FDM-печати, показал, что технологии термической постобработки (отжига) дают возможности существенно улучшить физико-механические характеристики готового продукта, приблизив их к свойствам изделий, полученных литьем под давлением. Однако на данный момент отсутствуют системные исследования влияния того или иного метода термической постобработки на свойства образцов, и практически нет упоминания применения данных технологий к реальным изделиям, полученным FDM-печатью.

В заключении первой главы сделаны выводы и поставлены задачи исследования, направленные на разработку структуры конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками.

Во второй главе разработана структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками на основе базовой структуры, описанной в ГОСТ 59037-2020 (рисунок 1).

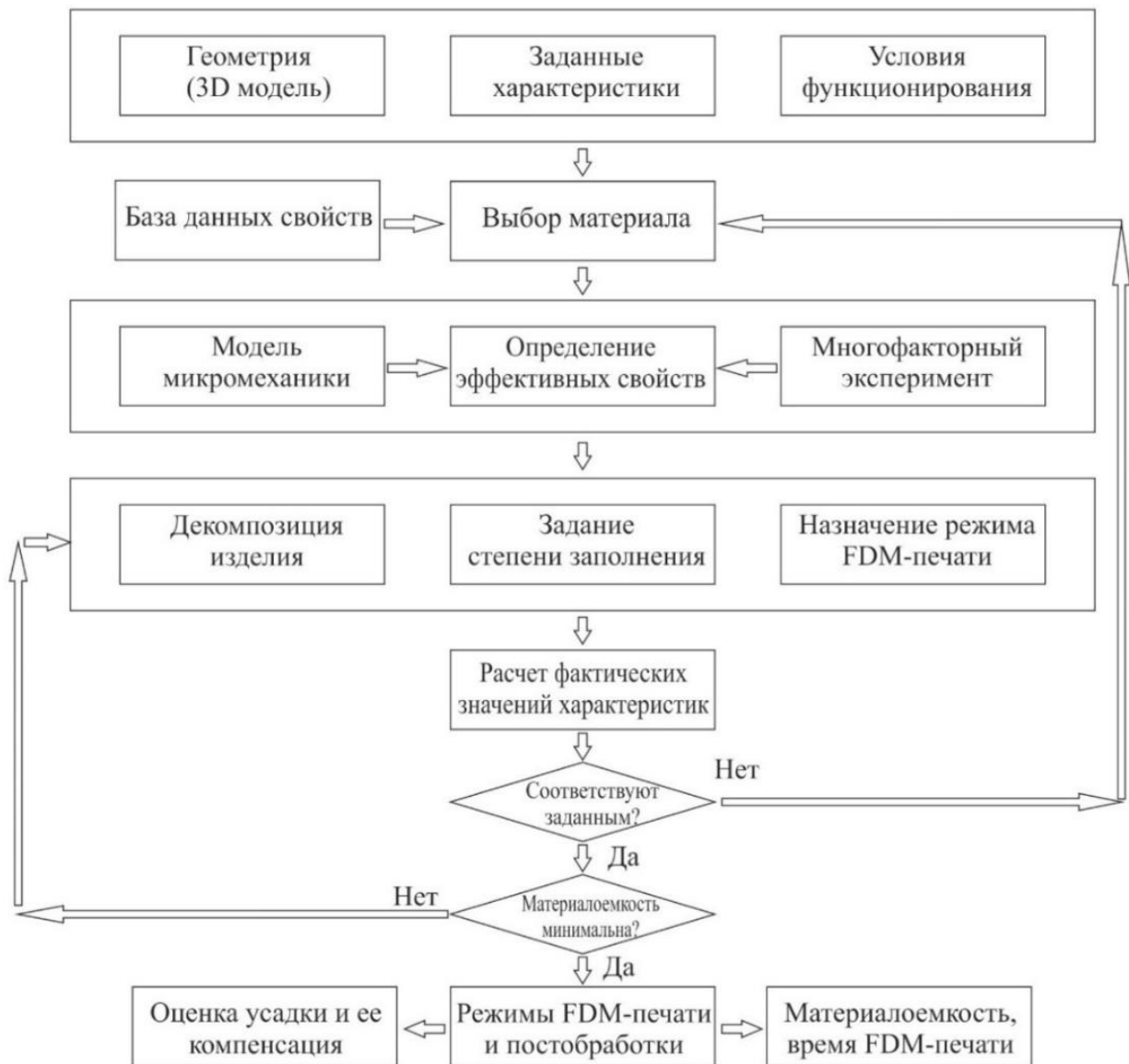


Рисунок 1 – Структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками

Структура конструкторского обоснования режимов FDM-печати изделий включает выбор материала и конструкции изделия с учетом специфики процесса FDM-печати, позволяющей значительно уменьшить массу изделия без потери прочности и жесткости. Структура технологического обоснования FDM-печати изделия включает выбор параметров FDM-печати и технологии постобработки в зависимости от требований, предъявляемых к изделию. Параметры печати и постобработки определяются экспериментально. Рациональные параметры печати позволяют добиться максимальной производительности с учетом специфики FDM-печати. Рациональные методы и параметры постобработки позволяют улучшить физико-механические свойства изделия.

**В третьей главе** численным методом проведено исследование эффективных характеристик изотропного и ортотропного материала при разной степени заполнения и установлены результирующие аналитические зависимости. Для определения эффективных свойств материала использован метод асимптотического осреднения, предполагающий, что материал имеет периодически повторяющуюся структуру, образованную набором минимальных элементов.

Расчет эффективных характеристик изотропного материала при различной степени заполнения проводился с использованием модели микромеханики со сферическим включением, имитирующим степень заполнения. Эффективные упругие характеристики изотропного материала описывались тремя параметрами:  $E$  – эффективный модуль упругости (модуль Юнга);  $\mu$  – эффективный коэффициент Пуассона;  $G$  – эффективный модуль сдвига. Моделирование проводилось в системе инженерного анализа COMSOL Multiphysics. Результаты численного моделирования распределения механических напряжений для различных значений степени заполнения для изотропного материала представлены на рисунке 2, где видно, что при малых степенях заполнения предельное значение коэффициента концентрации напряжений стремится к 3, а при больших степенях заполнения концентрация напряжений мала, поэтому коэффициент концентрации напряжений можно принять равным 1. Аналогичные зависимости были получены для других эффективных характеристик материала.

По результатам моделирования получены аналитические зависимости эффективных характеристик изотропного материала при разной степени заполнения:

$$\frac{E}{E_M} = -0,03321 + 0,00528 * V + 0,0000497017 * V^2, \quad (1)$$

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

$$\frac{\mu}{\mu_M} = -0,05083 + 0,01763 * V - 0,0000718288 * V^2, \quad (3)$$

$$K_{KH} = 2,98284 - 0,02277 * \exp(0,0437 * V). \quad (4)$$

Поскольку процесс FDM-печати характеризуется анизотропией свойств материала, для определения эффективных характеристик в зависимости от степени заполнения была разработана модель для ортотропного материала, имитирующая слои при FDM-печати при чередующемся их направлении  $0^\circ$  и  $90^\circ$ . Эффективные упругие характеристики ортотропного материала характеризовались шестью параметрами:  $E_{11}$  – модуль упругости в продольном направлении (в направлении печати или в слое);  $E_{33}$  – модуль упругости 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.



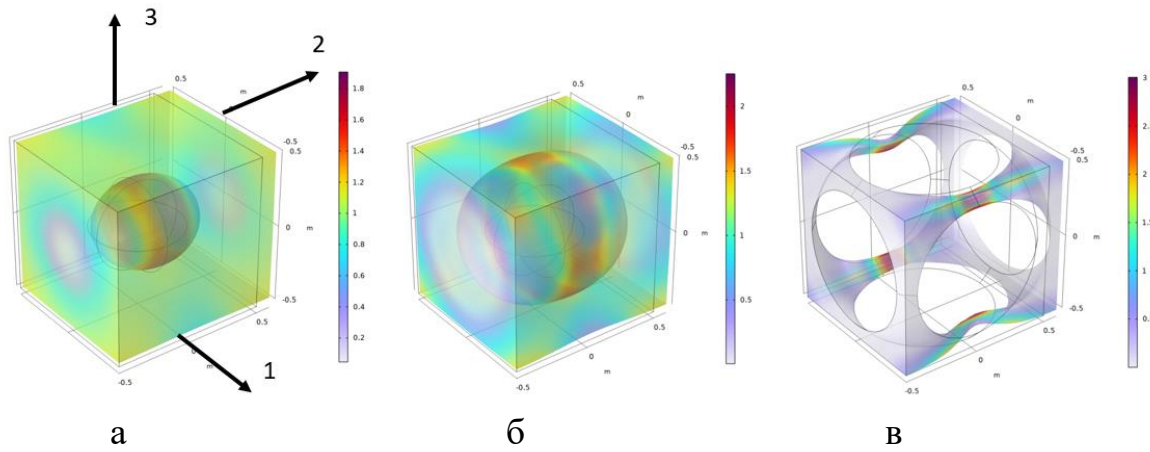


Рисунок 2 – Результаты численного моделирования распределения механических напряжений для различных значений степени заполнения:  
а – 90 %; б – 50 %; в – 10 %

В разработанной модели было принято, что  $E_{11} = E_{22}$ ,  $G_{23} = G_{13}$ ,  $\mu_{31} = \mu_{32}$ . Результаты численного моделирования – распределения напряжений для различных значений степени заполнения для ортотропного материала – представлены на рисунке 3.

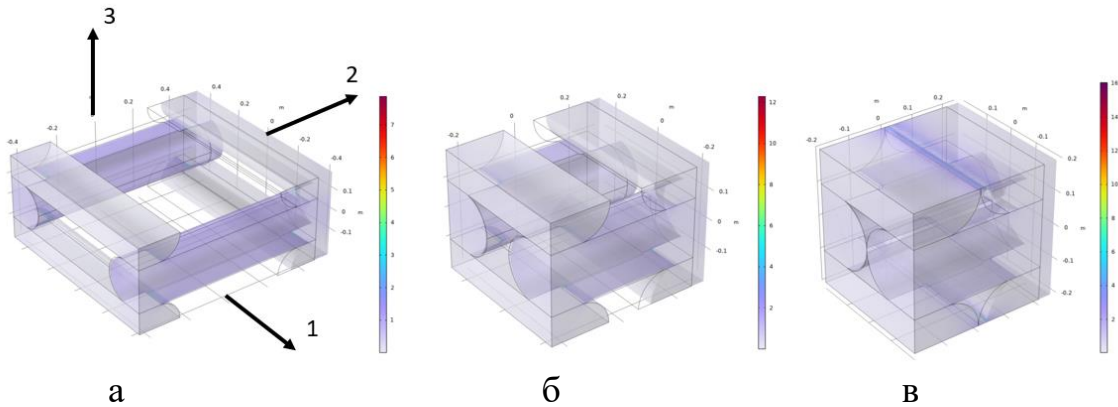


Рисунок 3 – Результаты численного моделирования – распределения напряжений для различных значений степени заполнения:  
а – 10 %; б – 50 %; в – 100 %

Для определения влияния величины перекрытия слоев на эффективные характеристики было проведено моделирование для значений  $\Delta h$  в диапазоне  $0,05h - 0,15h$ . Из сравнения экспериментальных и расчетных результатов можно сделать вывод, что перекрытие слоев при FDM-печати составляет  $0,1h$ , или 10 %. В результате численного решения были получены эффективные характеристики ортотропного материала в зависимости от степени заполнения: модули упругости, модули сдвига, коэффициенты Пуассона.

По результатам моделирования получены следующие аналитические зависимости эффективных характеристик ортотропного материала при разной степени заполнения:

$$\frac{E_{11}}{E_M} = 0,04763 + 0,01091 * V - 0,00044267 * V^2 + 0,00000797445 * V^3 + 0,0000000398832 * V^4, \quad (5)$$

$$\frac{E_{33}}{E_M} = -0,10896 + 0,01914 * V - 0,000774282 * V^2 + 0,0000125678 * V^3 - 0,0000000586554 * V^4, \quad (6)$$

$$\frac{G_{12}}{G_M} = 0,08244 + 0,01454 * V - 0,000612466 * V^2 + 0,00000943646 * V^3 + 0,0000000421311 * V^4, \quad (7)$$

$$\frac{G_{23}}{G_M} = -0,11769 + 0,01816 * V - 0,000755566 * V^2 + 0,0000114292 * V^3 - 0,0000000497618 * V^4, \quad (8)$$

$$\frac{\mu_{21}}{\mu_m} = 0,02697 + 0,00967 * V - 0,000373581 * V^2 + 0,00000644411 * V^3 - 0,0000000315236 * V^4, \quad (9)$$

$$\frac{\mu_{31}}{\mu_m} = -0,10803 + 0,03094 * V - 0,00106 * V^2 + 0,0000162935 * V^3 - 0,0000000785776 * V^4. \quad (10)$$

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. Анализ экспериментальных результатов показал, что изотропная модель в сравнении с экспериментальными данными имеет погрешность 30 % и может быть применима только для экспресс-оценки эффективных характеристик материала при разной степени заполнения. Ортоотропная модель имеет 7,16 % погрешности, что является допустимым. Таким образом, ортоотропная модель может быть применима для расчетов эффективных характеристик материала при разных значениях степени заполнения.

**В четвертой главе** реализован алгоритм регрессионного анализа экспериментальных данных. Для сравнения регрессионные модели были получены по двум методам: с использованием полного факторного эксперимента для трех факторов, состоящего из 27 экспериментов; с использованием трехуровневого плана Вох-Бейнкен для трех факторов, состоящего из 15 экспериментов. Значения физико-механических свойств образцов (предел прочности при растяжении, время обработки, плотность, пористость и модуль упругости для образцов, напечатанных под углом  $0^\circ$  и  $90^\circ$ ), полученных в результате экспериментов, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства, полученные в результате трехуровневого эксперимента Вох-Бейнкен

№	$\sigma(0^\circ)$ , 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

При сравнении результатов, полученных по двум регрессионным моделям и экспериментальным данным, установлено, что 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-Бейнкен, предполагающей проведение 15 экспериментов вместо 27 по полнофакторному плану. Были проведены исследования влияния параметров FDM-печати на основные свойства материала и получены уравнения регрессии, позволяющие определять рациональные параметры FDM-печати в зависимости от технических требований к изделию. Исследования проводились на образцах, изготовленных из АБС-пластика.

В результате математической обработки результатов экспериментов были получены уравнения регрессии свойств изделия и времени обработки от параметров FDM-печати. Ниже представлены уравнения, описывающие зависимости прочности материала от параметров печати. Аналогичные регрессионные зависимости были получены для всех параметров, представленных в таблице 1.

$$\sigma_{90^\circ} = -75 + 0,098 * T + 5 * h + 3,32 * V + 0,00040 * T^2 + 200 * h^2 - 0,0045 * V^2 + 0,1 * T * h - 0,01120 * T * V - 4,40 * h * V, \quad (11)$$

$$\sigma_{0^\circ} = 88,0 - 0,485 * T - 125,4 * h + 1,571 * V + 0,000976 * T^2 + 533,5 * h^2 - 0,00690 * V^2 + 0,040 * T * h - 0,00160 * T * V - 3,625 * h * V. \quad (12)$$

Проведенные исследования позволили оценить влияние технологических параметров процесса FDM-печати на физико-механические и конструктивные свойства образцов и обоснованно принять их в качестве обобщенных параметров процесса в функции критерия качества изделия.

Приведены методы исследования термических и реологических характеристик, физико-механических свойств экспериментальных образцов. Изложены методики применения объемной термической постобработки в дисперсной среде (гипс, тальк, соль), в замкнутой форме, вакуумном пакете, в комбинации с давлением. Представлены методы исследований свойств образцов. Проведено исследование влияния постобработки на деформацию образцов. Результаты постобработки представлены в таблице 2.

Таблица 2 – 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

В ходе экспериментальных исследований установлено, что с точки зрения улучшения физико-механических характеристик и для обеспечения минимальных деформаций напечатанных образцов в качестве дисперсной среды следует использовать гипс. Данные технологии постобработки можно адаптировать для других материалов, применяемых при FDM-печати, и применять для постобработки реальных изделий.

В пятой главе разработанная структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками использована при подготовке производства рабочего колеса вентилятора. Проанализированы технические требования, предъявляемые к рабочему колесу вентилятора. В качестве термопластичного материала использовался АБС-пластик, являющийся самым распространенным пластиком для FDM-печати. Конструкторское обоснование заключалось в изменении конструкции колеса путем изменения степени внутреннего заполнения.

По полученным аналитическим соотношениям (5) – (10) для ортотропного материала определялись эффективные характеристики материала, которые использовались при моделировании напряженно-деформированного состояния колеса в рабочих условиях.

В работе рассматривались три варианта конструкции рабочего колеса вентилятора (рисунок 4): монолитная, состоящая из двух частей с плоскостью разъема в середине лопаток с креплением «шип-паз» и состоящая из девяти частей. Монолитная конструкция была принята нецелесообразной из-за большого количества поддержек, требующих дополнительного расхода материала.

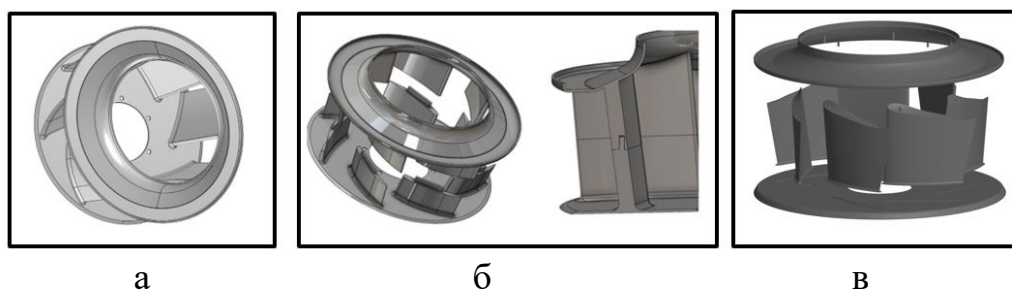


Рисунок 4 – Варианты конструкции рабочего колеса:

а – цельное колесо; б – колесо из двух частей; в – колесо из девяти частей

Результаты численного моделирования распределения напряжений (МПа) и распределения упругих перемещений (мм) для целого колеса из АБС-пластика представлены на рисунке 5.

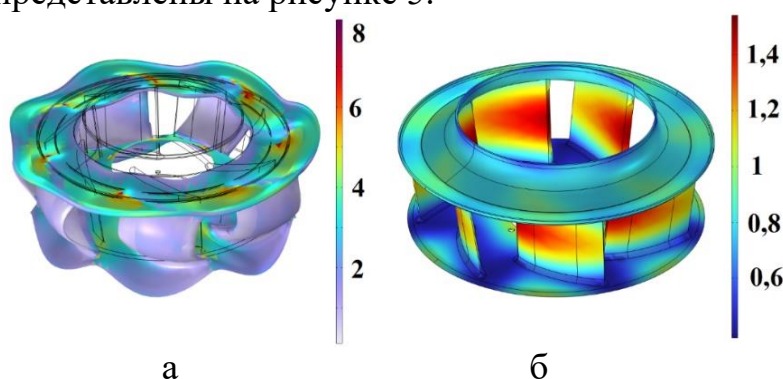


Рисунок 5 – Результаты численного моделирования:

а – распределения напряжений (МПа); б – распределения упругих перемещений (мм) целого рабочего колеса вентилятора из АБС-пластика при заполнении 60 %

Полученные напряжения сравнивались с допустимыми напряжениями, которые определяются исходя из коэффициента запаса и предельных напряжений. Коэффициент запаса прочности для рабочего колеса вентилятора составляет 1,5. Результаты моделирования для АБС-пластика представлены в таблице 3.

По результатам расчетов и моделирования оптимальными значениями степени заполнения для АБС-пластика является 60 %, а постобработка позволит увеличить коэффициент запаса. Выбранные значения степени заполнения позволяют обеспечить изделию минимальную массу при соблюдении заданных технических характеристик.

Таблица 3 – Результаты моделирования рабочего колеса вентилятора

Параметры	Базовая структура	Разработанная структура
Степень заполнения, %	100	60
Максимальные напряжения, МПа	14,5	8,1
Максимальные деформации, мм	1,01	1,49
Коэффициент запаса	1,69	1,34

В соответствии с разработанной структурой технологического обоснования режимов FDM-печати и на основании результатов экспериментальных исследований были выбраны параметры печати, позволяющие добиться максимальной производительности и минимизировать расход материала при соблюдении заданных технических требований. Основные параметры печати частей рабочего колеса вентилятора представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные параметры печати рабочего колеса вентилятора

Параметры	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

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 при применении для рабочего колеса вентилятора. Однако поскольку при данном методе постобработки наблюдались деформации, была проведена коррекция исходной модели (на 3,5 %) с учетом усадки. Оценка прочностных параметров изделия «рабочее колесо вентилятора» экспериментальным методом проводилась на специализированном стенде. Каждое рабочее колесо вентилятора было нагружено согласно заданной программе испытаний. Для сравнения было изготовлено рабочее колесо вентилятора по базовой структуре. Сравнение методов изготовления рабочего колеса вентилятора из АБС-пластика представлено в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры рабочих колес вентилятора

Структура FDM-печати	Время печати, ч	Расход материала, г	Масса изделия, г
Базовая	168	2289	1611
Разработанная	52	1050	850

Разработанная структура конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати изделий с заданными характеристиками была использована при выполнении ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Использование разработанной структуры конструкторско-технологического обоснования режимов FDM-печати позволило добиться максимальной производительности и наименьшей массы изделий при соблюдении технических требований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача разработки 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.

### **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 изделием служебного назначения.

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 исследованиям зависимости 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 уменьшение времени печати до 70 %, а также уменьшение 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 импортозамещении, а также в учебном процессе на кафедре «Электро- и нанотехнологии» ФГБОУ ВО «Тулский государственный университет».

Научные и практические результаты диссертации рекомендуется применять при изготовлении изделий с заданными характеристиками методом FDM-печати. Перспективы дальнейшей разработки темы диссертационной работы связаны с усовершенствованием технологии FDM-печати и расширением номенклатуры изделий с заданными характеристиками.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в журналах из перечня ВАК РФ*

1. Влияние постобработки на физико-механические свойства образцов, полученных методом FDM-печати / И.В. Гнидина, В.М. Волгин, А.П. Малахо, **А.А. Потапов** // Известия Тульского Государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 9. С. 326-334.

2. Говоров И.С. Исследование физико-механических свойств образцов после FDM- печати / И.С. Говоров, **А.А. Потапов**, А.Ю. Веневцев // Известия Тульского Государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 11. С. 446-450.

3. **Потапов А.А.** Конструкторско-технологическое обеспечение FDM-печати / **А.А. Потапов**. // Известия Тульского Государственного университета. Технические науки. Тула. ТулГУ. 2024. Вып 5. С. 388-396.

### *Публикации в журналах, входящих в международную систему цитирования Scopus*

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

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

6. Bulk post-treatment of FDM-printed samples / **А.А. Потапов**, А.П. Малахо, I.V. Gnidina, V.M. Volgin // Proc. SPIE, Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023). 2024. V. 12986. P. 1298604. DOI: 10.1117/12.3016485.

7. Supplementary treatment of FDM printed parts. Review / **А.А. Потапов**, V.M. Volgin, А.П. Малахо, I.V. Gnidina // Russ. Chem. Rev. 2024. V.93 (9). P. 21. DOI: 10.59761/RCR5127.

### *Публикации в других изданиях и материалах конференций*

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

9. Постобработка образцов после FDM-печати / **А.А. Потапов**, А.П. Малахо, И.В. Гнидина, В.М. Волгин. // Вестник Тульского государственного университета. Проблемы и перспективы развития автоматизации технологических процессов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. С 129-136.

10. Осипов П.Н. Влияние технологических режимов FDM-печати на свойства образцов из полиэфиримида / П.Н. Осипов, **А.А. Потапов**, И.С. Говоров // 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.

11. **Потапов А.А.** Постобработка образцов, изготовленных методом FDM / **А.А. Потапов**, П.Н. Осипов, И.С. Говоров // 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.

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

#### ***Патенты***

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611804 Российская Федерация. Программа для расчета нелинейных характеристик герметизирующих прокладок интерполяцией на параметрических поверхностях Безье; № 2024610791; заявлено 19.01.2024, опубликовано 24.01.2024, Бюл. № 2 / Волгин В.М., Малахо А.П., Калиш П.Э., **Потапов А.А.**; Правообладатель ФГБОУ ВО ТулГУ. – Зарегистрировано в Реестре программы для ЭВМ.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024664175 Российская Федерация. Программа для математической обработки данных дифференциальной сканирующей калориметрии; № 2024662716; заявлено 04.06.2024, опубликовано 18.06.2024, Бюл. № 6 / Волгин В.М., Малахо А.П., **Потапов А.А.**, Калиш П.Э. Правообладатель ФГБОУ ВО ТулГУ. – Зарегистрировано в Реестре программы для ЭВМ.

Подписано в печать 18.12.2024.

Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3.

Тираж 100 экз. Заказ 008а

Отпечатано в Издательстве ТулГУ  
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95