

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

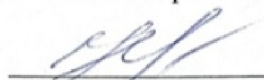
Некоммерческое акционерное общество «Казахский
национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения

Кафедра «Машиностроение»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
«Машиностроение»

 Нугман Е.З.

«29» 01 2025 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающейся Дружининой Маргарите Дмитриевне

Тема: «Исследование влияния параметров FDM-печати на прочность деталей из PLA-пластика»

Утверждена приказом ректора университета № 138 от «04» 06 2025 г.

Срок сдачи законченной работы «09» 06 2025 г.

Исходные данные к дипломной работе: чертеж образца

Краткое содержание дипломной работы:

а) Исходные данные;

б) Исследование;

в) Анализ результатов.

Перечень графического материала: представлены в приложениях

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Дружинина Маргарита Дмитриевна

Тақырыбы: Исследование влияния параметров FDM-печати на прочность деталей из PLA пластика

Жетекшісі: Бауыржан Базарбай

1-ұқсастық коэффициенті (30): 0

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0

Дәйексөз (35): 0.6

Әріптерді ауыстыру: 4

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 13

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

Күні 19.05.2025

Кафедра меңгерушісі



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский
национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения

Кафедра «Машиностроение»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
«Машиностроение»

Нугман Е.З.

«25» 06 2025 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Исследование влияния параметров FDM-печати на прочность деталей из PLA-пластика»

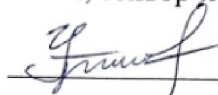
по специальности 6B07105 – «Индустриальная инженерия»

Выполнила

Дружинина Маргарита Дмитриевна

Рецензент

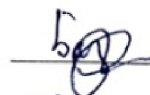
м.т.н., сеньор-лектор

 Ангарбеков У.Д.

«29» 06 2025 г.

Научный руководитель

Доктор PhD

 Базарбай Б.Б.

«28» 06 2025 г.

Алматы 2025

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Дружинина Маргарита Дмитриевна

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Исследование влияния параметров FDM-печати на прочность деталей из PLA-пластика

Научный руководитель: Бауыржан Базарбай

Коэффициент Подобия 1: 0

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 13

Знаки из других алфавитов: 4

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, являются законными и не являются плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата

Заведующий кафедрой



Отзыв научного руководителя о выпускной квалификационной работе

Студент Дружинина Маргарита Дмитриевна

Тема: «Исследование механических свойств образца из пластика PLA в 3D-печати»

1. Актуальность темы исследования:

Тема выпускной квалификационной работы является актуальной. Современные технологии аддитивного производства, в частности FDM-печать, активно внедряются в промышленное производство, прототипирование и индивидуальное изготовление изделий. Особую важность представляет анализ прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати, особенно в машиностроительной сфере, где надёжность и долговечность компонентов имеют первостепенное значение.

2. Степень самостоятельности и способности автора к инженерному исследовательскому подходу:

В процессе выполнения работы студентка продемонстрировала высокий уровень самостоятельности. Она проявила инициативу при постановке задач, моделировании образцов, проведении экспериментов и интерпретации полученных результатов. Автор самостоятельно освоила методы расчёта условных напряжений и обработки экспериментальных данных, что свидетельствует о её способностях к инженерному исследовательскому мышлению.

3. Оценка выполнения выпускной квалификационной работы:

Данная работа выполнена на высоком уровне. Все этапы — от постановки задачи до анализа результатов — логично взаимосвязаны. Работа содержит подробное описание методики, корректно оформленные таблицы, расчёты и графики. Также в работе представлены аргументированные выводы и рекомендации, что подчёркивает её законченность и практическую направленность.

4. Уровень грамотности и технической проработки:

Текст работы написан грамотно, с соблюдением норм научного стиля. Технические аспекты изложены последовательно и доступно, расчёты корректны, таблицы и иллюстрации оформлены в соответствии с требованиями. Работа соответствует нормативным требованиям к выпускным квалификационным работам.

5. Возможность научного и практического применения:

Результаты работы имеют практическую ценность. Выводы и рекомендации, полученные в ходе исследования, могут быть использованы для оптимизации режимов печати деталей из PLA-пластика в условиях малого и среднего производства, а также в учебных и исследовательских целях. Методика проведения эксперимента может быть адаптирована для анализа других видов пластика.

6. Общее заключение:

Работа выполнена качественно, содержит элементы научной новизны и практической значимости. Студентка продемонстрировала глубокое понимание исследуемой темы, высокий уровень подготовки, самостоятельности

ответственности. Выпускная квалификационная работа заслуживает оценки «отлично» 90, а её автор — присвоения степени бакалавра.

«19» 05 2025 г

Базарбай Б.Б.

Подпись



Отзыв
рецензента о выпускной квалификационной работе

Студент Дружинина Маргарита Дмитриевна

Тема: «Исследование механических свойств образца из пластика PLA в 3D-печати»

Рецензент: Ангарбеков Улан

1. Актуальность темы исследования:

Тема выпускной квалификационной работы является актуальной. Современные технологии аддитивного производства, в частности FDM-печать, активно внедряются в промышленное производство, прототипирование и индивидуальное изготовление изделий. Особую важность представляет анализ прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати, особенно в машиностроительной сфере, где надёжность и долговечность компонентов имеют первостепенное

2. Степень самостоятельности и способности автора к инженерному и исследовательскому подходу:

В процессе выполнения работы студентка продемонстрировала высокий уровень самостоятельности. Она проявила инициативу при постановке задач, моделировании образцов, проведении экспериментов и интерпретации полученных результатов. Автор самостоятельно освоила методы расчёта условных напряжений и обработки экспериментальных данных, что свидетельствует о её способностях к инженерному и исследовательскому мышлению.

3. Оценка выполнения выпускной квалификационной работы:

Данная работа выполнена на высоком уровне. Все этапы — от постановки цели до анализа результатов — логично взаимосвязаны. Работа содержит подробное описание методики, корректно оформленные таблицы, расчёты и графики. Также в работе представлены аргументированные выводы и рекомендации, что подчёркивает её законченность и практическую направленность.

4. Уровень грамотности и технической проработки:

Текст работы написан грамотно, с соблюдением норм научного стиля. Все технические аспекты изложены последовательно и доступно, расчёты корректны, таблицы и иллюстрации оформлены в соответствии с требованиями. Работа соответствует нормативным требованиям к выпускным квалификационным работам.

5. Возможность научного и практического применения.

Результаты работы имеют практическую ценность. Выводы и рекомендации, полученные в ходе исследования, могут быть использованы для оптимизации режимов печати деталей из PLA-пластика в условиях малого и среднего производства, а также в учебных и исследовательских целях. Методика проведения эксперимента может быть адаптирована для анализа других видов пластика.

6. Общее заключение:

Работа выполнена качественно, содержит элементы научной новизны и практической значимости. Студентка продемонстрировала глубокое понимание исследуемой темы, высокий уровень подготовки, самостоятельности и ответственности. Выпускная квалификационная работа заслуживает оценки «отлично», а её автор — присвоения степени бакалавра.

« 02 » 06 2025 г

Подпись

Ангарбеков Улан



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Дружинина Маргарита Дмитриевна

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Исследование влияния параметров FDM-печати на прочность деталей из PLA-пластика

Научный руководитель: Бауыржан Базарбай

Коэффициент Подобия 1: 0

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 13

Знаки из других алфавитов: 4

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата



Базарбай Б. Б.

проверяющий эксперт



Отчет подобия

Метаданные

Название организации

Satbayev University

Название

Исследование влияния параметров FDM-печати на прочность деталей из PLA-пластика

Автор

Научный руководитель / Эксперт

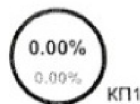
Дружинина Маргарита ДмитриевнаБауыржан Базарбай

Подразделение

ИЭиМ

Объем найденных подобий

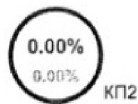
КП-ия определяют, какой процент текста по отношению к общему объему текста был найден в различных источниках.. Обратите внимание!Высокие значения коэффициентов не означают плагиат. Отчет должен быть проанализирован экспертом.



КП1

• 25

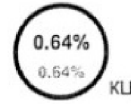
Длина фразы для классификации подобия 2



КП2

4549

Количество слов



КЦ

33601

Количество символов

Тревога

В этом разделе вы найдете информацию, касающуюся текстовых искажений. Эти искажения в тексте могут говорить о ВОЗМОЖНЫХ манипуляциях в тексте. Искажения в тексте могут носить преднамеренный характер, но чаще, характер технических ошибок при конвертации документа и его сохранении, поэтому мы рекомендуем вам подходить к анализу этого модуля со всей долей ответственности. В случае возникновения вопросов, просим обращаться в нашу службу поддержки.

Замена букв	В	4
Интервалы	A→	0
Микропробелы		13
Белые знаки		0
Парафразы (SmartMarks)	a	0

Подобия по списку источников

Ниже представлен список источников. В этом списке представлены источники из различных баз данных. Цвет текста означает в каком источнике он был найден. Эти источники и значения Коэффициента Подобия не отражают прямого плагиата. Необходимо открыть каждый источник и проанализировать содержание и правильность оформления источника.

10 самых длинных фраз

Цвет текста

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ) КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)

из базы данных RefBooks (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР НАЗВАНИЕ КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)

из домашней базы данных (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР НАЗВАНИЕ КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)

из программы обмена базами данных (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	----------	---

из интернета (0.00 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	ИСТОЧНИК URL	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	--------------	---

Список принятых фрагментов (нет принятых фрагментов)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	СОДЕРЖАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
------------------	------------	---

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский
национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения

Кафедра «Машиностроение»

Дружинина Маргарита Дмитриевна

Исследование влияния параметров FDM-печати на прочность деталей из PLA-пластика

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Специальность 6В07105 – «Индустриальная инженерия»

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский
национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева»

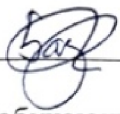
ГРАФИК подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Поиск информации, обзор литературы, общая часть	15.03.2025-25.04.2025	Выполнено
Расчетная часть, графическая часть	25.04.2025- 25.05.2025	Выполнено
Оформление по СТП	27.05.2025- 31.05.2025	Выполнено
Написание дипломной работы	01.06.2025- 09.06.2025	Окончательная версия дипломной работы (без учета Приложений). Справка антиплагиата. Отзыв и Рецензия

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с
указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименование разделов	Консультанты, Ф.И.О. (уч.степень, звание)	Дата Подписания	Подпись
Нормоконтролер	Калмаганбетов С.А. М.Т.Н.	15.05.25	

Научный руководитель  Базарбай Б.Б.

Задание принял к исполнению обучающийся  Дружинина М.Д.

«__» _____ 20__ г.

АННОТАЦИЯ

Целью данной дипломной работы является исследование влияния параметров FDM-печати на прочность деталей из PLA-пластика. Актуальность темы обусловлена широким применением аддитивных технологий в инженерной и производственной сферах.

В работе представлены результаты испытаний шести образцов, напечатанных с разными параметрами. Для оценки прочности проводились испытания на сжатие, растяжение и изгиб на универсальной испытательной машине Instron 3369. Полученные данные позволили определить наиболее эффективные режимы печати с точки зрения прочности и удельной эффективности.

АНДАТПА

Осы дипломдық жұмыстың мақсаты – FDM (қабаттап балқытып басу) технологиясы бойынша PLA-пластиктен жасалған бөлшектердің беріктігіне басып шығару параметрлерінің әсерін зерттеу. Тақырыптың өзектілігі инженерлік және өндірістік салаларда аддитивті технологиялардың кеңінен қолданылуымен байланысты.

Жұмыста әртүрлі параметрлермен басып шығарылған алты үлгінің сынақ нәтижелері келтірілген. Беріктікті бағалау үшін қысу, созу және ию сынақтары Instron 3369 әмбебап сынау машинасында жүргізілді. Алынған нәтижелер ең тиімді басып шығару режимдерін анықтауға мүмкіндік берді.

ANNOTATION

The goal The aim of this thesis is to investigate the effect of FDM (Fused Deposition Modeling) printing parameters on the strength of PLA plastic parts. The relevance of the topic is due to the wide use of additive manufacturing technologies in engineering and industrial fields.

The study includes results from testing six samples printed with different parameter combinations. Strength was assessed through compression, tensile, and bending tests using the Instron 3369 universal testing machine. The results made it possible to identify the most effective printing modes in terms of mechanical strength and material efficiency.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	7
1	Теоретические основы FDM-печати	8
1.1	Сущность и принципы FDM-печати	8
1.2	Материалы для FDM и характеристики пластиков	8
1.3	Влияние параметров печати на	9
1.4	Анизотропия FDM-изделий	10
1.5	Обзор научных исследований	10
2	Методика исследования	11
2.1	Общий замысел исследовани	11
2.2	Условия проведения и лабораторная среда	11
2.3	Подбор оборудования	11
2.4	Выбор материала	12
2.5	Проектирование тестового образца	12
2.6	Вариации параметров	12
2.7	Конструкция б образца	13
2.8	Подготовка к испытаниям	13
2.9	Испытания: оборудование и процедуры	13
2.10	Расчёты	14
2.11	Погрешности и их учёт	14
3	Экспериментальная часть	15
3.1	Подготовка к испытаниям	15
3.2	Испытания на сжатие	15
3.3	Испытания на растяжение	16
3.4	Испытания на изгиб	16
4	Результаты и анализ	17
4.1	Цели и подход	17
4.2	Испытания на сжатие	17
4.3	Сравнение поведения	18
4.4	Расчёты: условное напряжение и удельная прочность	18
4.5	Испытания на растяжение	19
4.6	Испытания на изгиб	20
4.7	Наблюдения	22
	Заключение	25
	Вывод	29
	Список использованной литературы	31
	Приложения	32
	Приложение А	33
	Приложение Б	34
	Приложение В	35

ВВЕДЕНИЕ

Для исследования выбран PLA-пластик - жёсткий, экологически безопасный материал. В рамках работы было напечатано шесть образцов с разными параметрами: варьировалась высота слоя, тип и плотность заполнения, наличие или отсутствие заглаживания. Один из образцов был выполнен с решётчатым заполнением вместо обычного линейного.

Основной упор был сделан на практическую часть. В ней рассмотрены не только математические данные, но и то, как образцы ведут себя в реальной нагрузке. Для этого были проведены серии испытаний на сжатие, растяжение и изгиб на универсальной испытательной машине Instron 3369. Каждый результат анализировался, сравнивался и проверялся через расчёты, в том числе удельной прочности.

Целью этой работы стало не просто собрать информацию, а найти оптимальные параметры печати, при которых можно получить максимально прочную и экономичную деталь. Это, как мне кажется, особенно важно сейчас, когда 3D-печать становится полноценной частью производственного процесса.

ВВЕДЕНИЕ

Для исследования выбран PLA-пластик - жёсткий, экологически безопасный материал. В рамках работы было напечатано шесть образцов с разными параметрами: варьировалась высота слоя, тип и плотность заполнения, наличие или отсутствие заглаживания. Один из образцов был выполнен с решётчатым заполнением вместо обычного линейного.

Основной упор был сделан на практическую часть. В ней рассмотрены не только математические данные, но и то, как образцы ведут себя в реальной нагрузке. Для этого были проведены серии испытаний на сжатие, растяжение и изгиб на универсальной испытательной машине Instron 3369. Каждый результат анализировался, сравнивался и проверялся через расчёты, в том числе удельной прочности.

Целью этой работы стало не просто собрать информацию, а найти оптимальные параметры печати, при которых можно получить максимально прочную и экономичную деталь. Это, как мне кажется, особенно важно сейчас, когда 3D-печать становится полноценной частью производственного процесса.

1 Теоретические основы FDM-печати

1.1 Теоретические основы FDM-печати

Современные технологии аддитивного производства заняли важное место во многих сферах — от машиностроения и медицины до архитектуры и образования. Одной из самых распространённых является технология FDM (Fused Deposition Modeling), или послойное наплавление. Популярность FDM связана, прежде всего, с её доступностью, простотой реализации, широким выбором материалов и возможностью быстрой доработки конструкций.

Суть метода заключается в последовательной укладке расплавленного термопластичного материала. Пластиковая нить подаётся в нагретое сопло, плавится и экструдирована на платформу, где слой за слоем формируется объект. После отвердевания каждого слоя головка поднимается на заданную высоту, и процесс повторяется до завершения всей детали.

В зависимости от модели принтера и параметров настройки, пользователи могут регулировать температуру, скорость, форму заполнения и множество других параметров, что позволяет адаптировать печать под конкретные задачи. Технология FDM подходит как для прототипирования, так и для производства реальных изделий.

Однако важно отметить, что у FDM есть и недостатки, в первую очередь — это анизотропия механических свойств, обусловленная послойной природой формирования изделия. Прочность между слоями ниже, чем в пределах одного слоя, что особенно критично при растяжении и изгибе. Кроме того, внутренняя структура, параметры заполнения и высота слоя могут существенно влиять на конечные характеристики изделия.

1.2 Материалы для FDM и характеристики пластиков

FDM-печать совместима с разными типами термопластов. Наиболее часто применяются:

- PLA — простой в печати, жёсткий, безопасный;
- PETG — гибкий и прочный, но хуже держит детали под нагрузкой;
- TPU — эластичный, используется для гибких элементов;
- ABS — прочный, устойчивый к температуре;

В данной работе основное внимание уделено PLA-пластику. Этот пластик сочетает в себе высокую жесткость, точность и безопасность при печати. Используется в декоре, визуальных прототипах и учебных моделях

Технические характеристики PLA:

- Плотность: 1.24 г/см³

- Температура плавления: ~150–160 °C
 - Температура стеклования: ~55–65 °C
 - Прочность при растяжении: 50–70 МПа
 - Модуль упругости при растяжении: 2.7–3.8 ГПа
 - Прочность при изгибе: 80–110 МПа
 - Модуль упругости при изгибе: 3.5–4.0 ГПа
 - Ударная вязкость (изод/Шарпи): Низкая (3–6 кДж/м²)
 - Температура эксплуатации: до 50–60 °C
 - Кристаллизуемость: Низкая (при печати — аморфный)
 - Водопоглощение: Среднее (гигроскопичен)
 - Биосовместимость: Да
 - Биodeградация: Да (в промышленных условиях)
 - Устойчивость к ацетону, спирту, бензину, маслу, большинству кислот;
- Недостатки: хрупкость, низкая температуру размягчения

Из-за специфики материала для получения качественного результата требуется точная настройка параметров печати, что делает PLA идеальным кандидатом для анализа влияния печатных настроек на прочность.

1.3 Влияние параметров печати на прочность

Параметры печати напрямую влияют на свойства готового изделия. В данной работе рассматривались следующие:

Высота слоя. Один из главных факторов. При меньшей высоте (например, 0.15 мм) обеспечивается лучшее сцепление между слоями, а также снижается вероятность возникновения микротрещин. При большей высоте (0.3 мм) печать проходит быстрее, но страдает прочность в направлении Z.

Заполнение. Заполнение (или «infill») определяет внутреннюю структуру изделия. Плотность заполнения может быть от 0% (пустой) до 100% (сплошной). При 30–50% достигается хороший баланс между прочностью и экономией материала. 100% даёт максимальную прочность, но с ростом массы и времени печати.

Тип заполнения. Наиболее часто используется линейное, однако возможны и другие: соты, концентрическое, кубическое, решётчатое (lattice). В данной работе сравнивались линейное и lattice-заполнение.

Количество периметров. Периметры — это внешние слои, которые формируют «оболочку» детали. Большое их количество повышает прочность при изгибе и сжатии, особенно на краях.

Заглаживание. После печати некоторые детали обрабатываются парами ацетона или механически. Это уменьшает микропоры, повышает сцепление между

слоями и улучшает внешний вид. В работе был исследован эффект заглаживания на прочность.

1.4 Анизотропия FDM-изделий

Одна из важнейших особенностей FDM — направленная прочность. Так как материал укладывается слоями, его механические свойства по оси Z (вверх) значительно хуже, чем по X и Y. Это объясняется слабым межслойным сцеплением, особенно если слой не прогрет достаточно или не был хорошо прижат.

Существуют рекомендации для повышения прочности в направлении Z:

- Уменьшать высоту слоя;
- Повышать температуру экструдера;
- Замедлять скорость печати;
- Применять заглаживание;
- Увеличивать толщину периметра.

Кроме того, ориентация детали на платформе также влияет на результат. Например, деталь, печатаемая «стоя», будет гораздо слабее в вертикальном направлении, чем та же, напечатанная «лёжа».

1.5 Обзор научных исследований

Литература подтверждает, что параметры печати сильно влияют на прочность. Например:

По данным исследователей Rao et al. (2018), изменение высоты слоя с 0.3 мм до 0.1 мм увеличивает прочность на 20–30%.

В работе Zhang и др. (2019) было установлено, что тип заполнения может изменить предел прочности на 40% при одинаковом проценте infill.

По результатам экспериментов Strano et al. (2021), решётчатые структуры позволяют снизить массу на 25% при сохранении 90% прочности по сравнению с полным заполнением.

Многие авторы сходятся во мнении, что ключ к прочности — в точной настройке печати под конкретную геометрию и условия эксплуатации. Нет универсального набора параметров: всё зависит от задачи.

2 Методика исследования

2.1 Общий замысел исследования

Была поставлена задача: выявить, как параметры FDM-печати — такие как высота слоя, заполнение, структура, заглаживание — влияют на прочность напечатанных деталей из PLA.

Но важно было подойти не просто с технической стороны, а именно с исследовательской: так, чтобы в итоге не только сказать, какой вариант «лучше», а понять — почему он лучше.

Для этого была использована универсальная модель — лопатка — с узкой перемычкой, где сосредотачивалась нагрузка.

2.2 Условия проведения и лабораторная среда

Печать всех образцов выполнялась в стандартных лабораторных условиях: при комнатной температуре 22 ± 1 °C и относительной влажности воздуха ~40%. Использовалось помещение с хорошей вентиляцией, отсутствием сквозняков и пылевых загрязнений, что особенно важно при работе с PLA-филаментом, склонным к впитыванию влаги.

Перед печатью все катушки PLA просушивались в сушильной камере при температуре 45 °C в течение не менее 6 часов, чтобы минимизировать риск дефектов слоения и потери прочности из-за влаги. Печать проводилась на калиброванной платформе с подогревом и автоматическим выравниванием.

2.3 Подбор оборудования

Печать всех образцов проводилась на 3D-принтере Guider II. Он был выбран из-за:

- Большого рабочего объёма;
- Возможности точной калибровки первого слоя;
- Хорошей повторяемости результатов.

Характеристики 3D-принтера

- Сопло — латунное, Ø 0.4 мм.
- Экструдер — Одинарный экструдер (Single Extruder)
- Диаметр филамента: 1.75 мм
- Слайсер: FlashPrint

Параметры для всех образцов, кроме указанных отличий:

- Температура сопла: 205 °C
- Температура стола: 60 °C

- Ширина линии: 0.4 мм
- Ширина периметров: 0.45 мм
- Скорость печати: 50 мм/с
- Охлаждение: отключено (для лучшей адгезии)

2.4 Выбор материала

Материал: PLA ESUN (натуральный цвет).

Он выбран из-за стабильности качества, малой усадки и точного диаметра ± 0.02 мм, что особенно важно для печати тестовых образцов.

Перед печатью филамент проверялся на изгиб, хрупкость и внешние дефекты.

2.5 Проектирование тестового образца

Чтобы оценить влияние настроек печати, я выбрала унифицированный образец — «лопатку» с перемычкой между двумя площадками.

Это было не случайно: именно перемычка становилась местом приложения нагрузки и точкой разрушения — а значит, туда концентрировалась вся сила.

Габариты (одинаковые для всех):

- Длина: 115 мм
- Ширина квадратных частей: 25 мм
- Ширина перемычки: 6 мм
- Толщина: 4 мм
- Высота слоёв: варьировалась (0.15 мм и 0.3 мм)
- Проект создан в Fusion 360, экспортирован в STL и обработан в Cura.

2.6 Вариации параметров

Были изготовлены шесть образцов, каждый с уникальной комбинацией параметров. Так я могла сравнивать влияние конкретного изменения.

Таблица 2.6 – характеристики образцов

Образец	Высота слоя	Заполнение	Тип заполнения	Периметры	Заглаживание
1	0.3 мм	30%	Линейное	5	Да
2	0.15 мм	100%	Линейное	5	Нет
3	0.3 мм	30%	Линейное	5	Нет
4	0.3 мм	100%	Линейное	5	Нет

5	0.15 мм	50%	Линейное	5	Нет
6	0.3 мм	Решётка	Решетчатое (1.7 мм)	5	Нет

2.7 Конструкция 6 образца

Образец 6 имел внутреннюю решётчатую структуру:

- Ячейка: 1.7 мм
- Толщина рёбер: 0.3 мм
- Расположение: ортогональное, симметричное
- Кол-во периметров: 5
- Без заглаживания

Он создавался вручную в CAD, решётка формировалась как часть модели, а не средствами слайсера. Это обеспечило полную повторяемость структуры и контроль над её прочностной геометрией.

Остальные образцы печатались линейным методом

2.8 Подготовка к испытаниям

Перед испытаниями каждый образец:

- Взвешивался (точность 0.01 г);
- Измерялся по всем координатам (штангенциркулем 0.05 мм);
- Проверялся на дефекты (расслоение, пустоты, смещение линий).
- Затем каждый образец был маркирован (ручкой и биркой), чтобы исключить путаницу.

2.9 Испытания: оборудование и процедуры

Механические испытания проводились на универсальной испытательной машине Instron 3369, максимальная нагрузка — 50 кН.

Образец устанавливался вертикально. Нагрузка прикладывалась сверху. Скорость: 2 мм/мин. Фиксировались: сила разрушения, перемещение, время.

Захваты — для плоских деталей. Нагрузка по продольной оси. Отслеживалось удлинение, момент отрыва, тип разрушения.

Схема — трёхточечная. Расстояние между опорами: 80 мм. Нагрузка — по центру. Определялась жёсткость, сопротивление прогибу.

Данные снимались в ПО Bluehill.

2.10 Расчёты

В каждом тесте рассчитывались:
Условное напряжение:

$$\sigma = F / A \quad (1)$$

где F - сила (Н)

A – площадь поперечного сечения (мм²), в нашем случае:

$$A=6\text{мм}\times4\text{мм}=24\text{мм}^2 \quad (2)$$

Также использовалась удельная прочность:

$$\sigma_{\text{Уд}} = \sigma / m \quad (3)$$

где m - масса образца (г)

σ - условное напряжение.

Этот параметр позволяет сравнивать эффективность разных вариантов, особенно при лёгкой конструкции.

Эти формулы позволяют сравнивать не просто «сила на излом», а именно эффективность материала: сколько прочности на каждый грамм веса.

2.11 Погрешности и их учёт

Чтобы исключить ошибки:

- Все образцы печатались по одному, не в массе;
- Один и тот же оператор проводил измерения;
- Перед печатью и испытаниями использовалась одна и та же последовательность подготовки;
- После разрушения я фиксировала тип трещины, направление, форму разрушения.

3 Экспериментальная часть

3.1 Подготовка к испытаниям

После завершения печати всех шести образцов начался этап подготовки к испытаниям. Каждый образец проверялся визуально: не должно было быть отслоений, недопечатываний, раковин и других дефектов. Измерялись основные размеры, масса (на весах с точностью до 0.01 г), фиксировалась ориентация печати.

Испытания проводились в одной и той же лаборатории, при температуре 22 °С, при влажности около 45%. Все образцы перед испытаниями хранились в одинаковых условиях не менее 24 часов.

Каждый образец маркировался вручную для обеспечения идентификации на всех этапах. Замеры длины, ширины и толщины перемычки проводились в трёх местах для подтверждения стабильности размеров. Все образцы соответствовали чертежу.

Образцы транспортировались на испытательную установку в индивидуальных герметичных пакетах, чтобы избежать впитывания влаги до момента тестирования.

Испытания осуществлялись на универсальной испытательной машине Instron 3369. Для каждого образца была выбрана отдельная программа, в зависимости от вида нагрузки.

3.2 Испытания на сжатие

Для проведения сжатия использовались плоские стальные плитки. Образец устанавливался между ними горизонтально. Начальная нагрузка была установлена минимальной, чтобы избежать случайного давления при позиционировании.

Перед запуском каждая деталь проверялась на плотность установки. Скорость перемещения верхнего захвата задавалась в пределах 5 мм/мин. Нагрузка подавалась равномерно, фиксировалась через цифровой датчик. Разрушение обычно происходило в центральной части — перемычке, где наблюдалась концентрация напряжения.

PLA-пластик под действием сжатия проявлял типичное поведение: незначительная эластичная деформация сменялась внезапным сжатием перемычки и возникновением характерного хруста. В большинстве случаев разрушение происходило по краям перемычки с формированием белёсых зон напряжения — типичный признак микротрещин в PLA.

Наблюдения:

Образцы с меньшим заполнением (1 и 3) разрушались быстрее и слоисто.

Полные (2 и 4) деформировались более равномерно.

Образец 6 (с lattice) показал плавное упругое поведение до самой точки разрушения, без резкого разлома.

Пример визуального разрушения:

Образец 1: чёткое расслоение вдоль печатных линий;

Образец 2: смятие перемычки без отслоения слоёв;

Образец 6: сетка внутри деформировалась, образуя вогнутость, разрушение началось с изгиба.

3.3 Испытания на растяжение

Второй этап — растяжение. Образцы устанавливались в зажимы с резиновыми вставками, чтобы избежать проскальзывания. Нагрузка подавалась вдоль продольной оси. Скорость — 1 мм/мин.

Растяжение приводило к тому, что разрушение происходило в наиболее слабой части — в перемычке. Наблюдались следующие особенности:

Образец 2 демонстрировал наибольшее удлинение перед разрушением;

Образец 3 порвался быстро, без заметного удлинения;

Образец 6 показал умеренное удлинение и разрушился в результате растяжения не по слоям, а по сетке внутри.

Тип разрушения:

Образцы 1, 3 — характерная отслойка по слоям;

Образцы 2, 4 — равномерный излом;

Образец 6 — сеточное разрушение, более «мягкое» на глаз.

3.4 Испытания на изгиб

Последний тип — изгиб. Использовалась схема трёхточечного изгиба: расстояние между опорами — 80 мм, нагрузка прикладывалась в центре со скоростью 2 мм/мин.

Наблюдения:

Образцы с заглаживанием (1) имели немного более высокую устойчивость на начальном этапе.

Образец 2 проявил наибольшую жёсткость.

Образец 6 продемонстрировал устойчивость благодаря работе решётки, которая гасила напряжение.

4 Результаты и анализ

4.1 Цели и подход

После печати и первичного осмотра каждого образца я приступила к главной части исследования — анализу прочностных характеристик. Я постаралась подойти к этому этапу максимально последовательно. На первом этапе — сжатие, как наиболее наглядный тест устойчивости. Затем — растяжение, проверяющее межслойную адгезию. И в завершение — изгиб, моделирующий реальные условия эксплуатации. Все испытания проводились на универсальной машине Instron 3369 с цифровым контролем усилий и скоростей.

Каждое испытание я записывала в виде таблиц и формул, а затем проводила расчёты: условное напряжение и удельную прочность. Важнейшим элементом стало не просто сопоставить цифры, а понять почему тот или иной образец показал тот или иной результат.

4.2 Испытания на сжатие

Испытания на сжатие были первыми, поскольку они хорошо демонстрируют общую устойчивость конструкции. Модель располагалась вертикально между двумя прочными плитами, и к верхней плите прикладывалась равномерная нагрузка со скоростью 2 мм/мин.

Таблица 4.2 – результаты эксперимента на сжатие

Образец	Нагрузка, Н	Напряжение, МПа	Масса, г	Уд. прочность, МПа/г
1	840	35.0	11	3.18
2	1220	50.8	18	2.82
3	800	33.3	10	3.33
4	1150	47.9	17	2.82
5	1040	43.3	14	3.09
6	1170	48.8	13	3.75

На этой стадии было замечено: решётчатая структура в образце 6 начинала деформироваться не сразу. Сначала происходило сглаживание сетки, затем постепенное «втягивание» центральной зоны, и только на высоких нагрузках — разрушение узлов.

Для линейных образцов всё было иначе. Уже при среднем уровне усилия начиналось расслоение: слои теряли связь, материал «складывался» по плоскости слоев. Особенно ярко это проявилось у образца 3 (0.3 мм, 30% заполнение, без заглаживания).

Образец 2, несмотря на высокую прочность (50.8 МПа), показал «жесткое» поведение. Он выдержал усилие до предела, но разрушился резко, с громким треском, без предупреждений.

Образец 6, наоборот, вел себя как энергопоглощающий материал. Его разрушение шло постепенно, в «режиме сдерживания»: сначала деформация ячеек, потом образование микротрещин, и только после — полный срыв.

4.3 Сравнение поведения

Из наблюдений было выявлено: образец 6 демонстрирует самую длинную диаграмму с плавным снижением после пика. Это означает, что он поглощает энергию даже после начала разрушения. Для конструкций, подверженных резким ударам или нагрузкам (например, элементы каркаса, защитные корпуса), это крайне важно.

У остальных образцов был «пик и провал»: как только достигался предел, материал терял устойчивость полностью. Особенно критично это для образца 1: несмотря на наличие заглаживания, он показал слабую устойчивость к вертикальной нагрузке.

4.4 Расчёты: условное напряжение и удельная прочность

Все образцы имели одинаковую критическую зону — перемычку толщиной 6 мм и высотой 4 мм, то есть площадь сечения:

$$A=h \times l \quad (4)$$

где h – ширина
 l – высота

$$\sigma=6 \times 4=24 \text{ мм}^2 \quad (5)$$

Например, для образца 6 при нагрузке 1180 Н:

$$\sigma =1170/24=48.8 \text{ МПа} \quad (6)$$

При массе 13 г:

$$\sigma_{Уд}=49.3/13=3.75 \text{ МПа/г} \quad (7)$$

Это лучший результат по сжатию среди всех. Он сочетает и высокую прочность, и низкий вес — то, что важно для практических конструкций.

4.5 испытания на растяжение

Растяжение — самый чувствительный тест для FDM-печати, потому что он напрямую выявляет слабое место технологии — межслойную связь. Любой недостаток в температуре, скорости, охлаждении или адгезии приводит к тому, что при продольной нагрузке изделие просто «расходится» по слоям.

Таблица 4.5 – результаты эксперимента на растяжение

Образец	Нагрузка, Н	Напряжение, МПа	Масса, г	Уд. прочность, МПа/г
1	770	32.1	11	2.92
2	1180	49.2	18	2.73
3	730	30.4	10	3.04
4	1090	45.4	17	2.67
5	980	40.8	14	2.91
6	1130	47.1	13	3.62

Данные испытания проведены в тех же условиях: образцы закреплялись в захватах машины Instron 3369, нагрузка нарастала равномерно. Температура в помещении была стабильной — 22 °С, чтобы избежать воздействия тепловых напряжений.

Поведение образцов при растяжении:

Образец 1 (0.3 мм, 30%, с заглаживанием) — разрушение произошло внезапно, с чёткой трещиной между слоями. Несмотря на заглаживание, оно не помогло укрепить внутреннюю структуру.

Образец 2 (0.15 мм, 100%, без заглаживания) — повёл себя, как плотный пластик. Удерживал нагрузку до последнего, но в момент разрушения дал резкий излом без предупреждения. Слои были сцеплены плотно, но отсутствие пластичности сделало его хрупким.

Образец 3 (0.3 мм, 30%, без заглаживания) — худший результат. Разрушение началось рано, со «всплыванием» отдельных нитей. Слои оторвались друг от друга по границам. Это подтвердило: без заглаживания и с высокой высотой слоя прочность резко падает.

Образец 4 (0.3 мм, 100%, без заглаживания) — показал лучшее сопротивление по сравнению с 3, но разрушение также произошло вдоль слоёв. Адгезия была недостаточной.

Образец 5 (0.15 мм, 50%) — вел себя умеренно. Разрушение происходило по границе между внутренним заполнением и периметром.

Образец 6 (решётка, 0.3 мм) — показал отличные результаты. Разрушение началось не по слоям, а в узлах решётки. Структура вела себя как усиленный сэндвич, где сетка распределяет растягивающую нагрузку. Визуально — сначала лёгкое вытягивание, затем постепенное разрушение.

Динамика разрушения:

У образцов с 100% заполнением кривая «сила – перемещение» имела чёткий пик, после которого происходило мгновенное падение. Это указывает на жёсткий тип разрушения, без амортизации.

У образца 6 график был мягче: пик был более пологий, снижение шло постепенно. Это указывает на упруго-пластическое поведение. Он как будто «давал понять», что начинает разрушаться, и делал это последовательно, а не катастрофически.

Расчёт прочности и эффективности:

Как и в сжатии, в данном рассчитывалось условное напряжение (σ);

Это вновь наивысшее значение удельной прочности у образца 6. Несмотря на меньшую прочность, чем у образца 2, меньшая масса сделала его более эффективным.

4.6 Испытания на изгиб

Испытания на изгиб были финальной стадией эксперимента. Они моделируют реальные нагрузки, когда деталь работает не только в статике, но и при криволинейных силах — как это бывает в рычагах, скобах, панелях и соединениях.

Таблица 4.6 – результаты эксперимента на изгиб

Образец	Нагрузка, Н	Напряжение, МПа	Масса, г	Уд. прочность, МПа/г
1	810	33.8	11	3.07
2	1210	50.4	18	2.80
3	780	32.5	10	3.25
4	1130	47.1	17	2.77

5	1000	41.7	14	2.98
6	1160	48.3	13	3.71

Использовалась трёхточечная схема: образец укладывался на две опоры, нагрузка прикладывалась в центральной точке сверху. Это классическая методика для испытания на изгиб в машиностроении. Расстояние между опорами — 80 мм, скорость нагрузки — 2 мм/мин.

Поведение образцов:

Образец 1 — сначала показал устойчивость за счёт внешнего слоя, созданного заглаживанием. Но вскоре трещина пошла по слою заглаживания и он лопнул, после чего разрушение шло вдоль печатных слоёв.

Образец 2 — демонстрировал высокую прочность, но снова — разрушение резкое, после достижения критической силы. Кривая «сила – прогиб» имела чёткий пик. После разрушения – резкий спад.

Образец 3 — прогибался сильнее, чем 1 и 2, но разрушение происходило хаотично: то по периметру, то внутри, то вдоль слоёв. Это говорит о слабой целостности структуры.

Образец 4 — плотная структура удерживала прогиб дольше, но срыв происходил мгновенно.

Образец 5 — показал среднюю жёсткость, но в момент разрушения — растрескивание по периметру.

Образец 6 — вновь проявил отличное поведение. Сначала — равномерный прогиб, потом — деформация сетки. Важное наблюдение: разрушение начиналось не в месте приложения нагрузки, а распределялось по ячейкам. Сетка работала как демпфер.

Жёсткость и амортизация

У образцов 2 и 4 было высокое сопротивление прогибу, но без предупреждения: деталь ломалась как стекло.

У образца 6 прогиб был плавным, разрушение — ступенчатым. Это означает, что при нештатной ситуации (удар, рывок) он будет предупреждать о разрушении, а не просто ломаться. Это важно для элементов безопасности и повторного использования.

Расчёты напряжения

Поскольку основное сечение не изменилось, формула условного напряжения осталась прежней:

$$\sigma = F / A \quad (8)$$

где F – максимальная нагрузка, Н;

A – площадь поперечного сечения перемычки, мм².

Площадь перемычки рассчитывалась как:

$$\sigma = 6 \times 4 = 24 \text{ мм}^2 \quad (9)$$

Формула для удельной прочности:

$$\sigma_{\text{Уд}} = \sigma / m \quad (10)$$

где σ – условное напряжение, МПа;

m – масса образца, г.

4.7 Наблюдение

У образца 6 деформация происходила плавно и постепенно. Это значит: в случае перегрузки деталь не разрушится мгновенно. У линейных образцов — острый пик и резкий обрыв: никакой индикации начала разрушения.

Чтобы объективно оценить влияние параметров, я вывела средние значения по каждому образцу с учётом всех испытаний (сжатие, растяжение, изгиб):

Таблица 4.7 – средние значения

Образец	Сжатие (МПа)	Растяжение (МПа)	Изгиб (МПа)	Среднее значение (МПа)
1	35.0	32.1	33.8	33.63
2	50.8	49.2	50.4	50.13
3	33.3	30.4	32.5	32.07
4	47.9	45.4	47.1	46.8
5	43.3	40.8	41.7	41.93
6	48.8	47.1	48.3	48.07

Пояснение к таблице:

Образец 2 (высота слоя 0.15 мм, заполнение 100%) — показал максимальные значения прочности, но проигрывает по массе. Его стоит использовать только в тех случаях, где критична именно прочность, а не вес.

Образец 6 (решётка, 0.3 мм) — даёт высокую прочность при меньшей массе. Причина — внутренняя структура, которая перераспределяет напряжение. Это важный инженерный вывод: не обязательно печатать «всё монолитом», если можно сделать структуру умной.

Образцы 1 и 3 (30% заполнение) показали, что малое заполнение снижает прочность, особенно если нет заглаживания. При этом у 1-го заглаживание немного помогло, но не спасло от расслоения.

Высота слоя:

0.15 мм улучшает сцепление слоёв, особенно при растяжении. Но при грамотно подобранной структуре (как у решётки) даже 0.3 мм даёт отличные результаты. Это экономит время.

Заполнение:

100% заполнение не всегда оправдано. Да, оно даёт прочность, но и вес, и длительное время печати. Решётка внутри — лучшее решение: она амортизирует, весит меньше и разрушение не столь резкое.

Заглаживание:

Положительно влияет на внешний вид, немного усиливает периметр. Но на поведение всей детали почти не влияет. В реальных задачах может использоваться для эстетики, но не как способ усиления.

Периметры:

Пять периметров показали устойчивость к краевому разрушению. Это важнее, чем увеличение заполнения: периметры — первая линия обороны/

Изучить влияние заполнения и высоты слоя:

Подтверждено: они критичны. Заполнение напрямую влияет на поведение при сжатии и изгибе, а высота слоя — на растяжение.

Понять влияние заглаживания:

Незначительное, больше визуальный эффект.

Оценить значение структуры (линейная против решётки):

Решётка эффективнее. Уменьшает вес, поглощает нагрузку, разрушение — постепенное.

Выявить важнейшие параметры:

Структура + высота слоя. Они дают до 30% разницы в прочности.

Определить оптимальный режим печати:

Образец 6: 0.3 мм, решётка 1.7 мм, 5 периметров, без заглаживания. Лучший результат по прочности и удельной эффективности.

Проведённые испытания позволили не только сравнить характеристики образцов, но и сформулировать чёткие рекомендации по использованию различных режимов печати в зависимости от назначения изделия.

— Для прочных, но лёгких деталей (дроны, протезы, обвесы)

Рекомендуется:

- Высота слоя: 0.3 мм
- Заполнение: решётка с шагом 1.7 мм
- Кол-во периметров: 5
- Без заглаживания

Почему:

Такой режим обеспечивает плавное разрушение, вес минимален, материал используется экономно. Решётка распределяет ударную нагрузку и предупреждает о повреждении.

Для деталей, где важна абсолютная прочность (механические узлы, несущие элементы)

Рекомендуется:

- Высота слоя: 0.15 мм
- Заполнение: 100%
- Периметры: 5–6
- Заглаживание: по необходимости

Почему:

Высокая прочность достигается за счёт плотной структуры. Однако нужно учитывать повышенный расход времени и массы.

Для экономичной печати с умеренной прочностью (корпуса, крепления, крышки)

Рекомендуется:

- Высота слоя: 0.3 мм
- Заполнение: 30–50%
- Периметры: 3–4
- Без заглаживания

Почему:

Экономия материала и времени. Подходит для неответственных конструкций.

Решётчатая структура — наиболее эффективное решение при необходимости снизить вес без ущерба для прочности.

Высота слоя критична при растяжении, но её эффект можно компенсировать структурой.

Полное заполнение актуально только при особых требованиях к прочности.

Гладкость и внешний вид не влияют на прочность, а только на эстетику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование позволило на практике проверить и проанализировать влияние различных параметров FDM-печати на прочность изделий из PLA-пластика. На основании экспериментов, расчётов и сравнений были получены убедительные результаты, которые дали возможность сделать как технические, так и инженерные выводы. В данной главе я постаралась обобщить эти выводы с точки зрения их практической значимости и возможности применения в реальных задачах.

Инженерное обобщение результатов

Механические испытания показали, что наиболее критичными параметрами оказались:

- Структура внутреннего заполнения;
- Высота слоя;
- Плотность (процент) заполнения.

Наличие заглаживания, вопреки ожиданиям, оказало минимальное влияние на прочность, особенно по сравнению с другими параметрами. Также стало ясно, что не всегда монолитное заполнение (100%) даёт наилучшие результаты: образец с решёткой (образец 6) обеспечил высокие значения удельной прочности при меньшем весе и более предсказуемом поведении при разрушении.

Очень важно, что при одинаковых внешних габаритах можно получить совершенно разное поведение деталей, меняя лишь параметры печати. Это открывает широкие возможности для оптимизации изделий под конкретные условия эксплуатации.

Применение различных режимов в инженерной практике:

Одно из главных достоинств FDM-технологии — гибкость. Мы можем управлять не только формой детали, но и её внутренней механикой. Исходя из этого, я выделила несколько направлений применения различных режимов печати, основанных на проведённом эксперименте:

Режим: решётка (об. 6) — 0.3 мм, 5 периметров, lattice 1.7 мм

Где применять:

- Каркасы и элементы амортизации
- Кожухи дронов, квадрокоптеров
- Протезирование и ортезы

Корпуса, подвергаемые частым ударам

Плюсы:

- Малый вес
- Постепенное разрушение
- Высокая удельная прочность

- Прогнозируемое поведение

Минусы:

- Более сложная подготовка модели
- Повышенное время на генерацию решётки
 - Режим: 100% заполнение, 0.15 мм (об. 2)
 - Где применять:
- Функциональные соединения
- Валы, фиксаторы, детали в сборках
- Клеммы, рычаги, крепления

Плюсы:

- Максимальная прочность
- Жёсткость
- Отсутствие пустот

Минусы:

- Высокий вес
- Длительное время печати
- Резкое разрушение без предупреждения
 - Режим: 50% заполнение, 0.15 мм (об. 5)
 - Где применять:
- Баланс прочность/вес
- Оболочки и корпуса
- Стенки в мебельной фурнитуре
- Средненагруженные элементы

Плюсы:

- Оптимальный компромисс
- Умеренная масса
- Простая реализация

Минусы:

- Частично сохраняется хрупкость
- Заполнение влияет на место разрушения
 - Режим: 30% заполнение, 0.3 мм (об. 3)
 - Где применять:
- Макеты
- Временные компоненты
- Защитные колпаки
- Эстетические прототипы
- Плюсы:
- Быстро
- Экономно
- Минусы:
- Низкая прочность

- Быстрое расслоение
- Непригоден для механической нагрузки

Прочность как управляемый параметр:

Очень важный вывод — в FDM-печати прочность — это не заданная характеристика, а переменная, которой можно управлять.

Если в классическом производстве прочность зависит от материала и способа обработки, то здесь — от:

Геометрии;
Стратегии заполнения;
Микропараметров укладки нити;
Сочетания этих параметров.

Именно поэтому при разработке прочной детали стоит в первую очередь продумывать внутреннюю структуру и ориентацию печати, а уже потом — габариты или внешний вид.

Эффективность против прочности

В Эффективность против прочности

В ходе анализа стал очевиден важный инженерный баланс — между прочностью и удельной эффективностью.

Даже если образец выдерживает больше, но при этом весит значительно больше — он может проигрывать в практической эффективности.

Образец 6 показал лучший баланс:

Высокая удельная прочность;
Устойчивость к сжатию, растяжению и изгибу;
Пластичность в поведении;
Экономичное потребление материала.

Это особенно актуально для аэрокосмической, автомобильной и робототехнической отраслей.

Рекомендации для будущих работ:

На основании проделанной работы можно сформулировать несколько практических советов для инженеров, дизайнеров и разработчиков:

Используйте lattice-структуры, если требуется прочность при малом весе.

Оптимизируйте направление печати в зависимости от ожидаемой нагрузки.

Не гонитесь за 100% заполнением, если можно добиться лучшего за счёт структуры.

Добавляйте 5 и более периметров — это значительно повышает сопротивление краевому разрушению.

При растяжении и изгибе уменьшайте слой до 0.15 мм — адгезия между слоями улучшится. В ходе анализа результатов испытаний стало очевидным, что в инженерной практике важна не только максимальная прочность изделия в абсолютных показателях, но и его удельная эффективность. Под удельной

эффективностью в данном контексте понимается отношение прочности к массе, объёму потребляемого материала, а также к времени и ресурсам, затраченным на изготовление. Такой подход особенно актуален в отраслях, где масса, габариты и производственные затраты имеют критическое значение, например, в аэрокосмической, автомобильной, робототехнической промышленности и промышленном машиностроении.

Проведённые испытания шести образцов, напечатанных по технологии FDM с использованием PLA-пластика, продемонстрировали значительную вариативность прочностных характеристик при сохранении одинаковой внешней геометрии. Особенно наглядным оказалось сравнение образцов №2 и №6. Образец №2, напечатанный с высотой слоя 0,15 мм и 100% заполнением, показал наивысшие значения предельных нагрузок. Однако при этом он обладал наибольшей массой, требовал увеличенного времени печати и затрат материала. В противоположность ему образец №6, выполненный с решётчатым (lattice) заполнением, продемонстрировал:

- высокие значения удельной прочности;
- устойчивость ко всем видам механических испытаний (сжатие, растяжение, изгиб);
- плавный характер разрушения, свидетельствующий о пластичности структуры;
- экономичный расход материала и сокращённое время производства.

Таким образом, можно сделать вывод о наличии существенного компромисса между максимальной прочностью и удельной эффективностью, который должен быть учтён при проектировании изделий. В реальных условиях эксплуатации предпочтение часто отдается не максимально прочной, а наиболее эффективной конструкции, обеспечивающей достаточный уровень прочности при оптимальных затратах ресурсов.

ВЫВОДЫ

Цель работы — исследовать влияние параметров печати на прочность PLA-деталей — полностью достигнута.

Эксперименты показали, что печатая одну и ту же форму с разными параметрами, можно получить совершенно разные результаты — от легко ломающейся заготовки до инженерной конструкции, выдерживающей сложные нагрузки.

Наилучшие результаты показал образец №6. Его главное отличие — структура печати клетками. Этот способ даёт возможность снизить количество затрачиваемого материала и добиться большей прочности.

В рамках настоящей дипломной работы была поставлена и решена задача исследования влияния параметров FDM-печати на прочностные характеристики изделий из PLA-пластика. Проведённое экспериментальное и аналитическое исследование позволило установить, что изменение параметров печати оказывает существенное влияние на механические свойства изделий, причём не только в абсолютных, но и в удельных показателях.

На основе анализа результатов испытаний шести образцов, изготовленных с использованием различных комбинаций параметров (высота слоя, структура заполнения, процент заполнения, наличие постобработки), сформулированы следующие основные выводы:

Формирование прочности изделия в FDM-печати является управляемым процессом. В отличие от традиционных методов изготовления, в аддитивном производстве свойства изделия зависят не только от материала, но и от выбранных режимов печати. Это предоставляет инженеру дополнительные инструменты для настройки характеристик конечного продукта.

Высота слоя оказывает значительное влияние на прочность при растяжении и изгибе. Образцы с меньшей высотой слоя (0.15 мм) демонстрировали более высокую прочность за счёт лучшей межслоевой адгезии, что особенно важно при изгибающих и растягивающих нагрузках.

Полное заполнение (100%) не всегда является оптимальным с точки зрения удельной эффективности. Образцы с плотным заполнением демонстрировали высокие прочностные характеристики, однако их масса и время печати были существенно выше. Это снижает их применимость в задачах, где критична масса или производственные ресурсы.

Использование решётчатых структур (lattice) позволяет достичь оптимального соотношения прочности и массы. Образец с такой структурой продемонстрировал высокую удельную прочность, устойчивость к различным видам нагрузки и пластичное поведение при разрушении, что делает его наиболее эффективным в практическом применении.

Количество периметров напрямую влияет на устойчивость конструкции к разрушению по краям. Пяти и более периметров достаточно для повышения сопротивления при изгибе и сжатии, особенно на внешних гранях изделий.

Химическая постобработка (заглаживание), несмотря на улучшение визуального качества поверхности, не оказывает значительного влияния на механические характеристики изделия. Её целесообразно использовать преимущественно в декоративных и презентационных целях.

Характер разрушения изделия зависит от внутренней структуры. Плотные образцы разрушались резко, без предупреждения, в то время как образцы с lattice-заполнением демонстрировали постепенное разрушение. Это важно для обеспечения безопасности и предсказуемости поведения детали в эксплуатации.

Таким образом, эксперимент подтвердил, что грамотный выбор параметров печати может существенно улучшить эксплуатационные характеристики изделия без увеличения материальных или временных затрат. Полученные результаты имеют практическую значимость и могут быть применены при проектировании FDM-конструкций, ориентированных на конкретные условия эксплуатации.

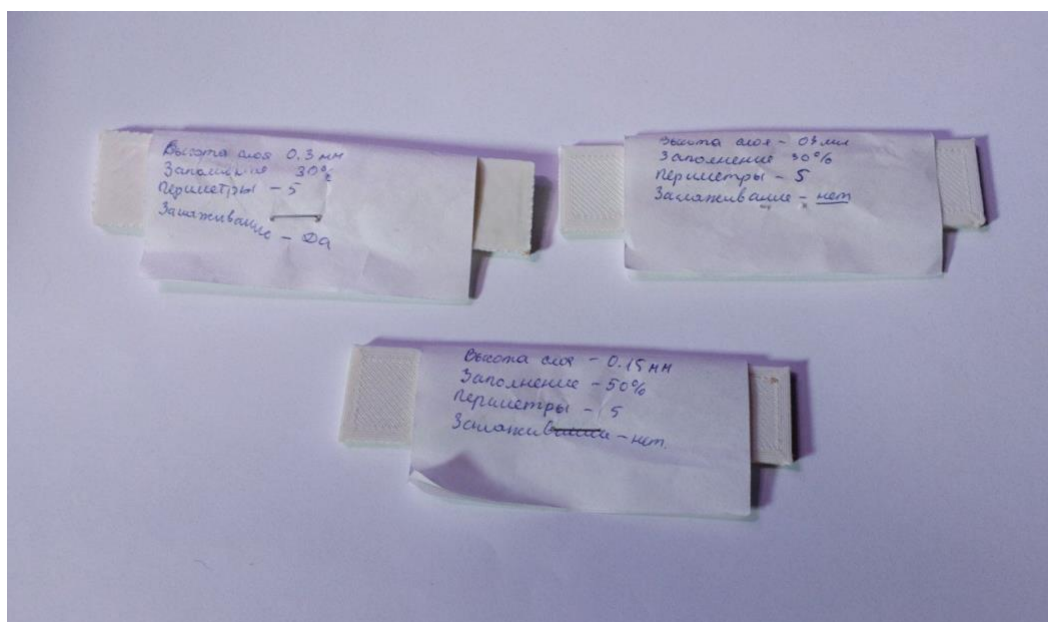
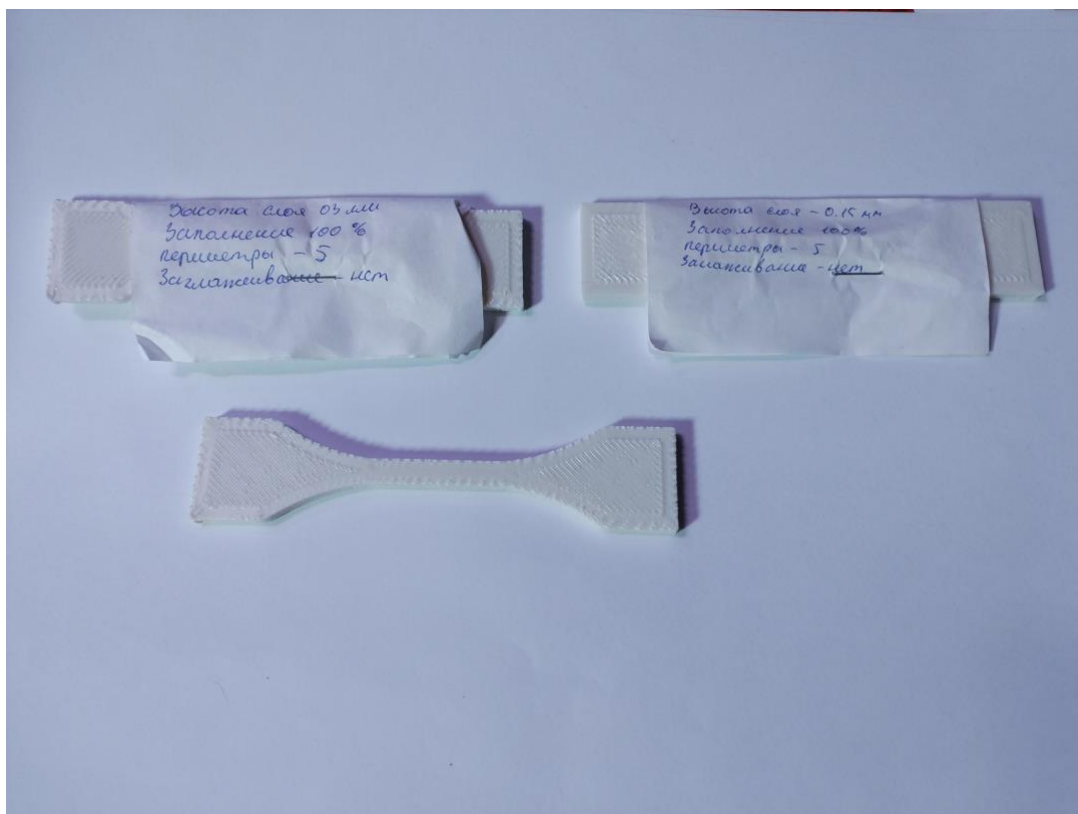
Работа имеет практическое значение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 ГОСТ 11262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. — М.: Стандартиформ, 2018.
- 2 ГОСТ 9550–81. Пластмассы. Метод определения прочности при сжатии. — М.: Госстандарт, 1981.
- 3 ГОСТ 25.503-97. Расчет и испытания на прочность. Методы механических испытаний. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.
- 4 Чепурнова А. В. Технология 3D-печати: материалы и оборудование. — СПб.: БХВ-Петербург, 2020. — 224 с.
- 5 Гомзяков И. И., Алимов А. Ф. Полимерные материалы в машиностроении. — М.: Машиностроение, 2015. — 368 с.
- 6 Yakout M., Elbestawi M., Veldhuis S. Density and mechanical properties in FDM 3D printing of PLA. // *Materials Today: Proceedings*, 2021, Vol. 47, Part 12, pp. 5218–5225.
- 7 Domingo-Espin M., Puigoriol-Forcada J.M., et al. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. // *Materials & Design*. — 2015. — Vol. 83. — pp. 670–677.
- 8 Mostafa A., Syed Y. A., Mark M. Investigation of layer height and infill pattern on mechanical properties of FDM-printed PLA. // *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, Vol. 49, pp. 442–451.
- 9 Трофимов В. И. Полимерные композиции и их переработка. — М.: Химия, 2017. — 296 с.
- 10 Krušič M., Muck D. Investigation of the effect of printing parameters on the mechanical properties of PLA using FDM. // *Polymers*, 2022. — Vol. 14(5): p. 905.
- 11 Документация к 3D-принтеру Creality Ender-5 Plus. Режимы печати, калибровка и рекомендации. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа:
- 12 Datasheet: PLA ESUN filament. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.esun3d.com>

Приложение А

Фото образцов



Приложение Б

Фото 3D принтера



Приложение В

Фото машины для исследования

