

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева

Институт энергетики и машиностроения

Кафедра «Машиностроение»

Жанатаева Айя Джамбуловна

Исследование дефектов, обнаруженных в образцах,
разработанных из 3D-принтеров в технологии FDM

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Специальность 6B07105 – «Индустриальная инженерия»

Алматы 2025

Институт энергетики и машиностроения

Кафедра «Машиностроение»



ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Исследование дефектов, обнаруженных в образцах, разработанных из 3D-принтеров в технологии FDM»

по специальности 6B07206 – «Индустриальная инженерия»

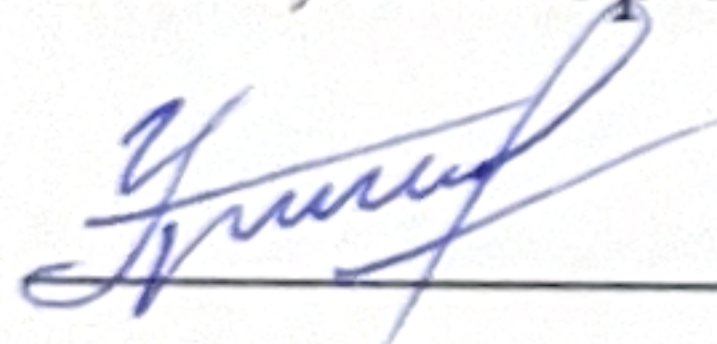
Выполнила

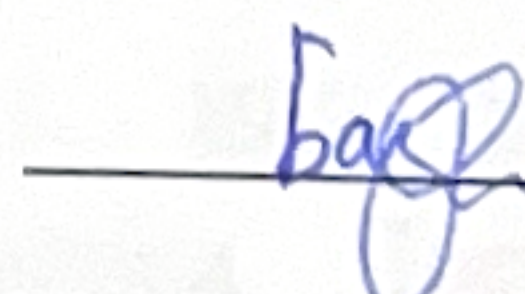
Жанатаева Айя Джамбуловна

Рецензент

м.т.н., сеньор-лектор

Научный руководитель
Доктор PhD

 Ангарбеков У.Д.

 Базарбай Б.Б.

«03» 06 20 25 г.

«03» 06 20 25 г.

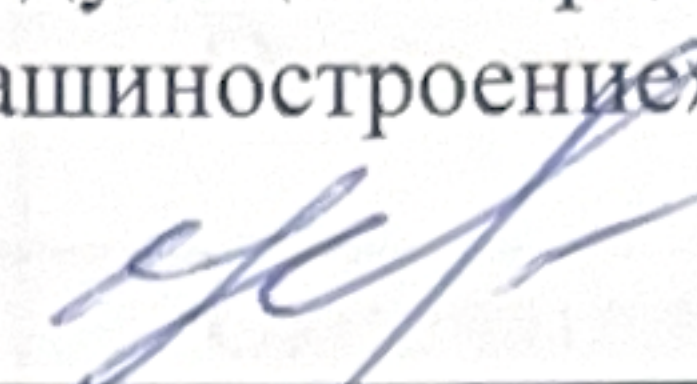
Институт энергетики и машиностроения

Кафедра «Машиностроение»

6B07105 – «Индустриальная инженерия»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
«Машиностроение»

 Нұрғман Е.З.

«29» 01 20 25 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающейся Жанатаевой Айя Джамбуловне

Тема: «Исследование дефектов, обнаруженных в образцах, разработанных из 3D-принтеров в технологии FDM»

Утверждена приказом ректора университета № 183 от «04» 06 20 25 г.

Срок сдачи законченной работы «09» 06 20 25 г.

Исходные данные к дипломной работе: 1. ISO 286-1:210 Размерные и геометрические требования к изделиям и их проверка. Доступ к принтерам УПЛ «PolyTechPoint».

Перечень вопросов подлежащих изучить и представить в дипломной работе:

- а) Обзор и анализ дефектов, обнаруженных в образцах;
- б) Методы повышения точности;
- в) Проверка допусками и зазорами.

Перечень графического материала: изложить материалы диссертации в 13 слайдах графического материала.

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Обзор и анализ дефектов, обнаруженных в образцах	01.09.2024-31.12.2024	Отчет не менее 20 стр.
Методы повышения точности	01.01.2025- 15.02.2025	Отчет не менее 15 стр.
Проверка допусками и зазорами	16.02.2025- 31.03.2025	Отчет не менее 10 стр.
Написание дипломной работы	01.04.2025- 30.04.2025	Окончательная версия дипломной работы не более 30 стр. (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.	17. 05. 25	

Научный руководитель  Базарбай Б.Б.

Задание принял к исполнению обучающийся  Жанатаева А.Д.

Дата « 29 » 05 20 25 г.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Жанатаева Айя Джамбуловна

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Исследование дефектов, обнаруженных в образцах, разработанных из 3D-принтеров в технологии FDM

Научный руководитель: Бауыржан Базарбай

Коэффициент Подобия 1: 0.3

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 7

Знаки из других алфавитов: 0

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

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Жанатасва Айя Джамбуловна

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Исследование дефектов, обнаруженных в образцах, разработанных из 3D-принтеров в технологии FDM

Научный руководитель: Бауыржан Базарбай

Коэффициент Подобия 1: 0.3

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 7

Знаки из других алфавитов: 0

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

Заведующий кафедрой



**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: Жанатаева Айя Джамбуловна

Тақырыбы: Исследование дефектов, обнаруженных в образцах, разработанных из 3D-принтеров в технологии FDM

Жетекшісі: Бауыржан Базарбай

1-ұқсастық коэффициенті (30): 0.3

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0

Дәйексөз (35): 0.4

Әріптерді ауыстыру: 0

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 7

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.

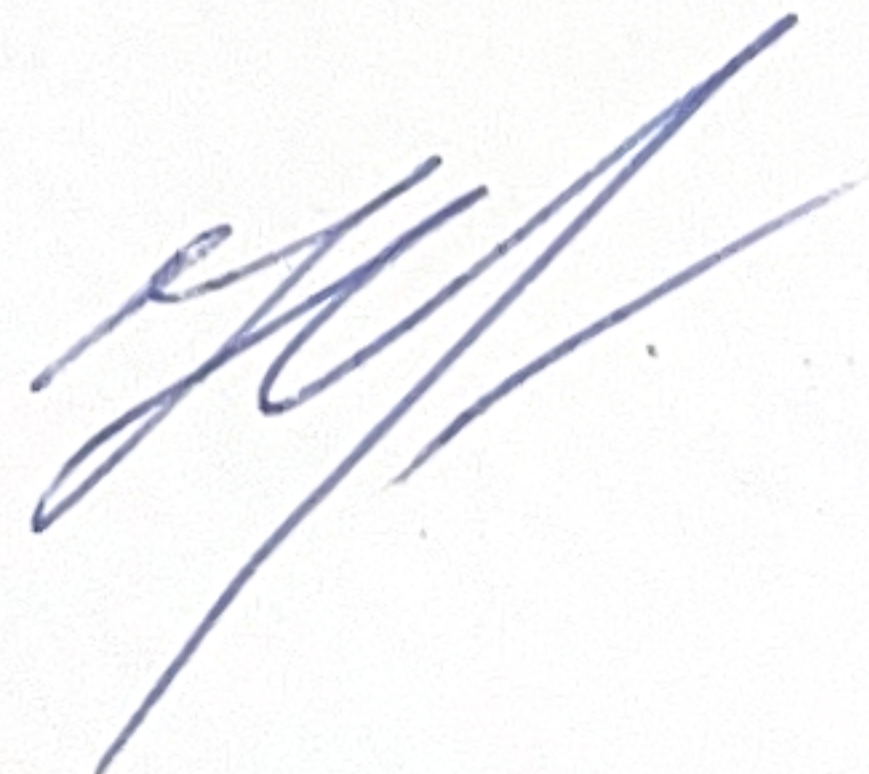
☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

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

Негіздеме:

Күні

Кафедра меңгерушісі





Отчет подоби

Метаданные

Название организации

Satbayev University

Название

Исследование дефектов, обнаруженных в образцах, разработанных из 3D-принтеров в технологии FDM

Автор

Научный руководитель / Эксперт

Жанатаева Айя Джамбуловна Бауыржан Базарбай

Подразделение

ИЭиМ

Объем найденных подоби

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 коэффициента подоби 2



КП2

3417

Количество слов



КЦ

25475

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		0
Интервалы		0
Микропробелы		7
Белые знаки		0
Парафразы (SmartMarks)		1

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
		КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)	
1	Perbaikan Toleransi Ukuran Diameter Inti Produk Shoulder Clamp Dengan Mempertimbangkan Kapabilitas Proses Pengecoran Tupan J. M.;	11 0.32 %

из базы данных RefBooks (0.32 %)

ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР	НАЗВАНИЕ	КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)
Источник: Paperity		
1	Perbaikan Toleransi Ukuran Diameter Inti Produk Shoulder Clamp Dengan Mempertimbangkan Kapabilitas Proses Pengecoran Tupan J. M.;	11 (1) 0.32 %

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)
------------------	------------	---

Отзыв
научного руководителя о выпускной квалификационной работе

Студент Жанатаева Айя Джамбуловна

Тема: «Исследование дефектов, обнаруженных в образцах, разработанных
3Д принтеров в технологии FDM.»

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.

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.

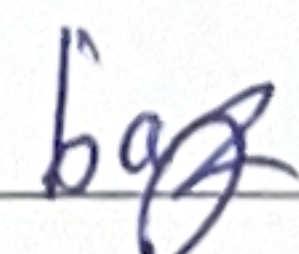
Данная работа выполнена на высоком уровне. Все этапы — от постановки задачи до анализа результатов — логично взаимосвязаны. Работа содержит подробное описание методики, корректно оформленные таблицы, расчёты и графики. Также в работе представлены аргументированные выводы и рекомендации, что подчёркивает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

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.

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.

« 19 » 05 2025 г

Базарбай Бауыржан Бакытбекұлы

Подпись 

Рецензия на дипломную работу

Название работы: *«Исследование дефектов, обнаруженных в образцах, разработанных из 3D-принтеров в технологии FDM»*

Автор работы: *Жанатаева Айя Джамбуловна*

Представленная дипломная работа Жанатаевой Айя Джамбуловны на тему «Исследование дефектов, обнаруженных в образцах, разработанных из 3D-принтеров в технологии FDM» является актуальным и важным исследованием в области аддитивных технологий. Актуальность темы обусловлена широким распространением FDM-печати и необходимостью повышения качества и точности изделий, создаваемых с помощью этой технологии, для их более активного применения в промышленности.

Целью работы было выявление основных дефектов, обнаруженных в образцах, созданных с помощью 3D-принтеров на основе технологии FDM, анализ их причин и оценка влияния на механические свойства изделий, а также разработка методов минимизации этих дефектов.

Работа содержит комплексное исследование, охватывающее обзор дефектов FDM-печати, анализ методов повышения точности и верификацию результатов с использованием систем допусков. В ходе исследования были применены методы анализа полученных результатов и сравнения их с существующими стандартами.

Основные результаты работы демонстрируют возможность производства объектов с помощью FDM 3D-принтеров в допустимых пределах по допуску, посадке и типу посадки, что является значимым достижением. Особое внимание уделено важности правильной калибровки настольных FDM 3D-принтеров, что подтверждает понимание автором практических аспектов работы с оборудованием.

Ценным результатом является доказательство способности 3D-принтера «понимать» размер допуска, установленный с помощью системы допусков ISO 286. Это позволяет проводить прямое сравнение с традиционными производственными технологиями (точение, фрезерование, сверление и т.д.) и отклонениями, определенными в системе ISO 286, что значительно повышает ценность FDM-технологии как инструмента для точного производства. Также предоставлена мера допуска округлости, что расширяет возможности контроля качества.

Дипломная работа Жанатаевой А.Д. представляет собой серьезное и цельное исследование, имеющее как научную, так и практическую ценность. Достигнутые результаты имеют прикладное значение и могут быть использованы для оптимизации процессов FDM-печати, повышения точности и качества производимых изделий. Работа выполнена на высоком уровне, демонстрирует глубокое понимание темы и способность автора к самостоятельному научному поиску.

Дипломная работа заслуживает высокой оценки – 93 баллов и рекомендуется к защите, а при успешной защите Жанатаева А.Д. достойна присвоения академической степени бакалавра технических наук.

Рецензент

м.т.н., сеньор-лектор

Алматинского Технологического Университета



Ангарбеков У.Д.

2025 г.

АНДАТПА

Бұл балқытылған тұндыру модельдеуімен (FDM) немесе балқытылған жіптерді жасаумен (FFF) 3D басып шығару технологиясымен байланысты ықтимал сәтсіздіктер мен кемшіліктерді көрсетеді. Бұл дипломдық жұмыстың мақсаты FDM/FFF әдісін қолданып полимерлер мен композиттерді 3D басып шығаруға арналған қазіргі және жаңа материалдармен және жабдықтармен көп жылдық тәжірибеге негізделген операциялық перспективалардағы сәтсіздіктер мен кемшіліктерді сипаттау болып табылады. FDM немесе FFF 3D басып шығару, сонымен қатар аддитивтік өндіріс (AM) технологиясы ретінде белгілі, компьютер үлгісінен үш өлшемді бөлікті жасау үшін әдетте жіптер түріндегі шикізат қабат-қабат қосылатын материалды өңдеу және дайындау әдісі.

АННОТАЦИЯ

В этой дипломной работе освещаются потенциальные сбои и недостатки, связанные с технологией 3D-печати методом послойного наплавления (FDM) или методом послойного наплавления нитей (FFF). Основное внимание в этой работе уделяется описанию сбоев и недостатков, вызванных эксплуатационными точками зрения и основанных на многолетнем опыте работы с текущими и новыми материалами и оборудованием для 3D-печати полимеров и композитов с использованием метода FDM/FFF. 3D-печать FDM или FFF, также известная как технология аддитивного производства (AM), представляет собой метод обработки и изготовления материалов, при котором сырье, обычно в виде нитей, добавляется слой за слоем для создания трехмерной детали из компьютерной модели. Они происходят, а обзор отказов и дефектов в деталях помогает исследователям и операторам узнать о причинах и последствиях дефектов на практике.

ANNOTATION

This thesis highlights the potential failures and drawbacks associated with fused deposition modeling (FDM) or fused filament fabrication (FFF) 3D printing technology. The focus of this thesis is to describe the failures and drawbacks from operational perspectives based on many years of experience with current and new materials and equipment for 3D printing of polymers and composites using the FDM/FFF method. FDM or FFF 3D printing, also known as additive manufacturing (AM) technology, is a material processing and fabrication method in which raw materials, typically in the form of filaments, are added layer by layer to create a three-dimensional part from a computer model.

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	7
1	Обзор и анализ дефектов при печати	9
1.1	Распространенные дефекты, возникающие при печати FDM	9
1.2	Модель отклеивается от печатного стола или не липнет к нему	12
1.3	Пластик не давится из сопла	13
1.4	Слоновья нога	14
1.5	Переэкструзия пластика	15
1.6	Недозэкструзия пластика	15
1.7	Волосатость или паутинка на готовой модели	16
1.8	Пропуск слоев	17
1.9	Расслоение модели	18
1.10	Звон	19
1.11	Провисание некоторых частей модели	20
2	Устранение дефектов	21
2.1	3D-принтер	21
2.2	Калибровка экструдера	21
2.3	Выравнивание стола	22
2.4	Проверка шагов осей и перекосов	22
3	Точность технологии FDM 3D-печати на основе полей допусков	23
3.1	CAD-модель	23
3.2	Компенсация размеров	24
3.3	Система пределов и посадок ISO 286-1:2010	25
3.4	Процедура бесконтактного измерения	27
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	29
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	30

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование методом послойного наплавления (FDM) как экономически эффективная альтернатива традиционному производству. Моделирование методом послойного наплавления (FDM) или изготовление методом послойного наплавления (FFF) — это применение технологии аддитивного производства, которая использует нагревательную камеру для разжижения полимера, который затем подается и экструдруется системой в форме нити. В этой статье термин FDM будет использоваться в целях обеспечения единообразия. Во многих случаях нити, используемые в принтере FDM, состоят из воска и/или термопластичного полимера (рисунок 1); однако эта технология также предлагает возможность внедрения и печати композитных материалов. Технология FDM широко используется в коммерческих приложениях. Это связано с относительной прочностью деталей, производимых с использованием приложений FDM.

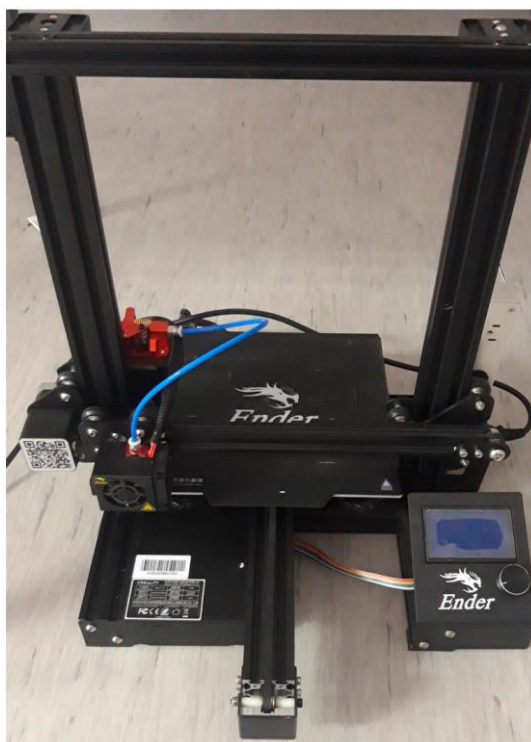


Рисунок 1 – Пример FDM 3D-принтера с катушкой полимерной нити

По сравнению с традиционным производством, аддитивное производство с использованием методов FDM более экономически эффективно. Хотя первоначальные инвестиции в 3D FDM-печать могут быть существенными, ее применение в прототипировании и проектировании деталей экономит как время, так и экономические ресурсы. Помимо преимуществ от более низкой стоимости сырья, сокращение времени изготовления и трудозатрат, а также близкая к нулю переработка материала из-за отсутствия субтрактивного процесса изготовления значительно влияют на общую стоимость изготовления деталей по сравнению с

традиционными технологиями производства. Тип и размер 3D-принтера определяют общую сопутствующую стоимость. При наличии сложной геометрии, доступной производителям/изготовителям, которая была бы нереалистичной при использовании традиционных средств, ответом является FDM. Основные проблемы, возникающие в связи с растущим применением аддитивного производства FDM по сравнению с традиционным производством, заключаются в возможности обнаружения внутренних дефектов и в оценке качества деталей.

Аддитивное производство или 3D-печать также использовались для деталей, изготовленных из композитных материалов. Сочетание двух материалов в качестве основы для разработки композитных материалов разрабатывалось на протяжении многих лет для достижения улучшенных механических и материальных свойств, таких как более высокие соотношения прочности к весу, а также тепловые и/или электрические функции. 3D-печать композитных материалов имеет свои собственные плюсы и минусы. Она обеспечивает возможность печати деталей со сложной геометрией и контролируемыми размерами, но в то же время имеет определенные ограничения в отношении армирующих материалов, которые могут быть добавлены к базовому полимеру для печати полимерного матричного композита. Кроме того, как разработка композитных материалов путем добавления армирующих частиц, так и печать такой комбинации материалов могут вызывать определенный вид дефектов и аномалий в напечатанных деталях или ненадлежащую функциональность 3D-принтеров. Некоторые из основных типов таких дефектов включают коробление и геометрические искажения, пустоты и пористости в матрице и нити, плохое соединение волокна с матрицей и неравномерное распределение армирования в базовом полимере матрицы. Например, однородность смешивания армирующего и базового полимера является распространенной проблемой, которая может вызвать значительные изменения свойств композитного материала. Соответствующие распространенные типы дефектов и отказов полимерных и композитных материалов и их 3D-печати обсуждаются в следующем разделе.

1 Обзор и анализ дефектов при печати

1.1 Распространенные дефекты, возникающие при печати FDM

С широким применением и быстрым ростом аддитивно изготовленных материалов первостепенное значение приобретает забота о целостности и безопасности деталей и методов испытаний. В отличие от традиционно изготовленных деталей, из-за природы полимерных FDM-материалов традиционные испытания на прочность/деформацию или дефектоскопические испытания приведут к повреждению и разрушению детали. В настоящее время наиболее распространенными дефектами являются пористость и изменения плотности внутри материала. Это вызвано различными проблемами, но наиболее распространенными являются экологический и производственный контроль применения температурных и влажностных изменений в процессе изготовления [1].

Технология FDM изготавливает деталь посредством цикла нагрева и охлаждения нити. Для PLA рекомендуемая температура составляет от +200°C. Однако рекомендуемая температура будет варьироваться в зависимости от диаметра нити и экструзионного сопла печатающей головки. Температура экструзии имеет решающее значение в печати FDM. Температура напрямую влияет на вязкость и адгезию нити, которые являются решающими факторами функциональности печати. Для деталей, которые предназначены для эстетических целей, этот вопрос не рассматривается. Для деталей, изготовленных для их результирующей функциональности в рамках целой интегрированной системы, этот вопрос является пугающим.

Тепловые несоответствия, влияющие на изготовление деталей

Применение тепла имеет жизненно важное значение в FDM как для полимерной, так и для композитной печати. Процесс экструзии должен поддерживаться на протяжении всего процесса печати. В технологии FDM самой большой проблемой является постоянство нагрева. В 21 веке в обращении находится несколько различных типов принтеров FDM. Хотя существует большое разнообразие типов нитей, в этой статье основное внимание будет уделено применению акрилонитрилбутадиенстирола (ABS) и полимолочной кислоты (PLA). В принтерах FDM существует два распространенных применения тепла. Первое применение тепла происходит внутри термопары, прикрепленной к экструдеру головки принтера. Эта термопара управляется программным обеспечением, используемым принтером. Она работает с использованием циклического нагрева, что означает, что термопара достигнет требуемой температуры, а затем применение тепла будет прекращено до тех пор, пока она не упадет до температуры, выходящей за пределы диапазона допуска. Такое отсутствие постоянства является повторяющейся и существенной проблемой в приложениях FDM. При неравномерном нагреве/охлаждении полимерной нити адгезия нанесенных слоев будет различаться, что приведет к неравномерной плотности и консистенции между слоями детали.

На адгезию слоя печати FDM сильно влияет температура окружающей среды, создаваемая термопарами, подключенными к печатной платформе. В закрытой системе термопары, прикрепленные к нижней стороне печатной платформы, создают и поддерживают среднюю температуру. Эта температура задается программным обеспечением принтера в соответствии с требованиями к филаменту, указанными в программном обеспечении для нарезки. Колебания температуры печатной платформы приведут к деформации базового слоя печати. Эта деформация приведет к неравномерной печати и сбоям в остальной части печати. Когда базовые слои деформируются, вероятность попадания на экструзионную головку принтера резко возрастает, а адгезия печати к печатной платформе будет поставлена под угрозу. Если нить наносится на печатную платформу при температуре, которая увеличивает вязкость, печать не сможет прилипнуть на микроуровне, тем самым снижая поверхностное натяжение между печатной платформой и самой печатью. Этот тип дефекта очень распространен в условиях открытого пространства принтера, в основном из-за колебаний параметров окружающей среды в неконтролируемой среде [2].

Когда печатная платформа нагревается до температуры выше рекомендуемой для печати, риск переплавления печати и снижения адгезии печатной платформы к детали значительно возрастает. Если нить не затвердевает постепенно, печатающая головка выдавит нить, которая не прилипнет к печатной платформе. Это приведет к «воздушной печати», или выдавливанию нити в воздух, а не прикреплению к печатной платформе. Это более распространенная проблема для принтеров, которые имеют менее пяти термопар и открытую среду печати. Принтеры с менее чем пятью термопарами имеют более высокую вероятность появления холодных точек и неравномерного нагрева из-за перекрывающихся диапазонов. Это связано с тем, что термопары работают в среднем диапазоне температур, а не поддерживают постоянную температуру. Термопары будут колебаться в пределах диапазона, создавая эту среднюю температуру, сообщаемую между ними. Когда термопары работают, они должны учитывать не только диапазоны температур горячего конца, но и воздействие внешней среды.

Дефекты, связанные с волокнами в композитах

Однако было показано, что добавление армирующих материалов или волокон к базовому полимеру полезно для улучшения свойств материала в композитах, но они также могут вызывать ряд проблем с точки зрения образования дефектов и проблем с улучшенными механическими свойствами. Одна из этих проблем возникает из процесса разработки и использования исходного материала. Смешивание волокон с матричным полимером должно быть выполнено таким образом, чтобы конечный состав был максимально однородным. Однородность состава является не только существенным фактором для улучшения механических свойств, но и устраняет концентрацию напряжений в определенных областях или слабых областях композитного материала. При 3D-печати композитных материалов ожидается, что в конечной детали будет четко определенная ориентация волокон. Несколько различных

факторов как исходного композитного материала, так и производственного процесса могут вызвать локальное отклонение выравнивания волокон. Такое локальное несоосность волокон называется волнистостью. Если композитная деталь содержит дефекты волнистости, она с большей вероятностью подвергнется разрушению в областях волнистости или вокруг них во время испытания на прочность или в течение срока службы конструкции. Несколько исследований оценили волнистость и ее влияние на механические свойства и разрушение композитного материала. Как объяснялось ранее, волнистость волокон, в дополнение к нескольким другим факторам, таким как производственный брак и изогнутая геометрия, и координация, может генерировать связанный дефект, который обычно возникает из-за несоосности волокон. Несоосность волокон особенно важна в однонаправленных композитных материалах и, как показано, оказывает значительное влияние на механические свойства композитных материалов. В армированном волокном полимерном композите волокна считаются основным несущим компонентом материала. Из-за важной роли волокон в структурной целостности композитных материалов разрыв волокон оказывает значительное влияние на общую прочность и ударную вязкость композитных деталей. Поскольку обрыв волокна представляет собой распределенный тип дефекта в композитных материалах, необходимо исследовать и оценить как локализованное, так и общее влияние этих дефектов на несущую нагрузку композитную деталь, подверженную дефектам обрыва волокна.

На рисунке 2 показаны распространенные дефекты и неисправности деталей и машин, возникающие при FDM-печати полимеров и композитов, которые описаны в следующих разделах [3].

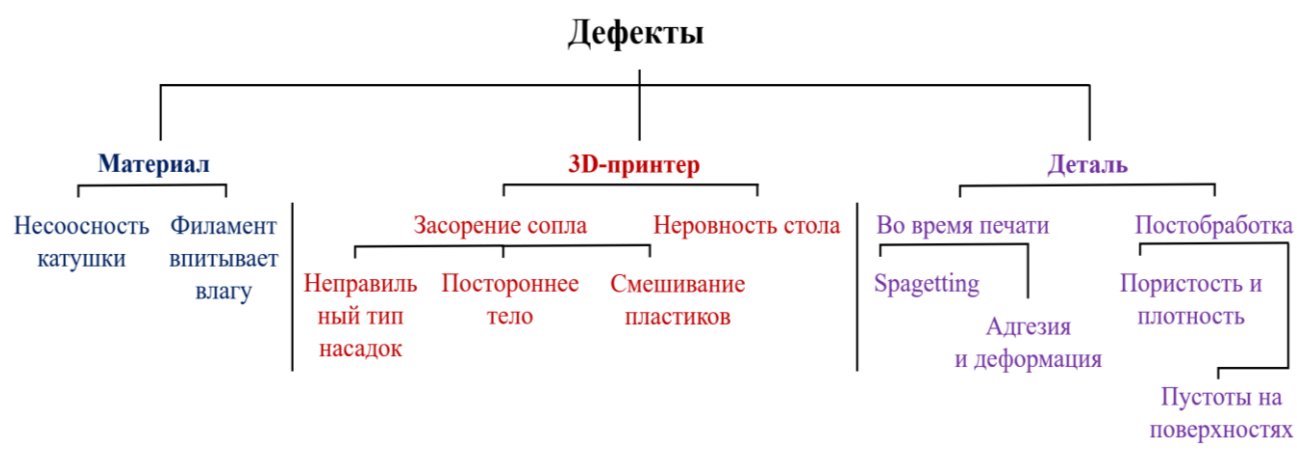


Рисунок 1.1 – Распространенные дефекты, возникающие при FDM-печати

1.2 Модель отклеивается от печатного стола или не липнет к нему

У каждого 3D печатника был случай, когда первый слой предательски скатывается, цепляясь за экструдер или самое обидное - когда отрывает от стола частично напечатанную модель. Первый слой должен прилипнуть намертво иначе ничего не напечатается (Рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Модель отклеивается от печатного стола или не липнет к нему

Слишком большой зазор между столом и соплом

Нужно просто выставить правильный зазор между столом и соплом.

В современных принтерах часто используется система автокалибровки (автовыравнивания) стола или вспомогательная программа выравнивания стола. Для калибровки таких принтеров воспользуйтесь инструкцией. Если инструкции нет, ее можно скачать на сайте производителя.

Если у вас простой принтер без автокалибровки, самосборный или КИТ набор, для калибровки используйте щуп или сложенный пополам кусочек бумажки. Щуп должен быть слегка прижат соплом к столу. Перед калибровкой стол и экструдер нужно нагреть. Поочередно выровняйте поверхность стола над каждым регулировочным винтом (их может быть 3 или 4) и только потом проверяйте центральную точку.

Пластик с плохой адгезией

Некоторые виды пластика из-за разных причин, например большая усадка, плохо прилипают к поверхности печатной платформы. В этом случае попробуйте использовать наклейки или специальные 3D клеи для улучшения адгезии между столом и первым слоем пластика.

На заре 3D печати проводились эксперименты с разными домашними рецептами 3D клеев. ABS разведенный в ацетоне, клей БФ, сахарный сироп и даже пиво. Некоторые эксперименты были удачны. До сих пор некоторые

энтузиасты в качестве 3D клея используют некоторые виды лаков для волос или клеев карандашей. Но все же они уступают по своим свойствам промышленным 3D клеям.

Некоторые виды высокотемпературных пластиков с большим процентом усадки (ABS, Нейлон и т.д.) могут отклеиваться от стола во время печати. Это происходит из-за неравномерного остывания и “сжимания” модели (нижние слои уже остыли, а верхние еще нет). Для таких пластиков нужно обязательно использовать 3D принтер с подогреваемым столом и закрытым корпусом.

Слишком низкая температура пластика

Чем сильнее разогрет пластик при выходе из сопла, тем лучше он прилипнет к печатной платформе. Первые 5-10 слоев лучше печатать на более высокой температуре (+ 5-10 градусов) и отключить вентилятор обдува.

Неправильные настройки первого слоя (скорость и толщина)

Более толстый слой прилипает проще, поэтому стандартно первый слой имеет толщину 0,3мм. При увеличении скорости печати нагревательный блок может просто не успевать нагревать пластик до нужной температуры, и он будет хуже прилипать к столу. Перед печатью проверьте в слайсере настройки скорости и толщины первого слоя [4].

1.3 Пластик не давится из сопла

Принтер уже вроде начал печатать, но печатный стол остается пустым. Или часть модели не напечаталась (Рисунок 1.3).

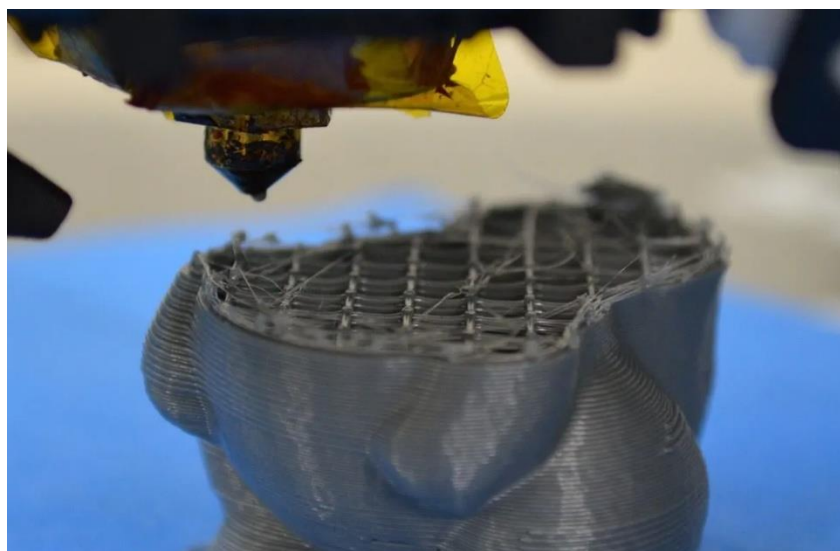


Рисунок 1.3 – Пластик не давится из сопла

Забитое сопло

В 3D печати сопло – это расходник. Сопла забиваются или изнашиваются (частота зависит от типа пластика). Самое простое – это заменить сопло. Но если под рукой не оказалось запасного - можно попробовать почистить старое. Для

этого существует целый набор тонких иголок. Или можно разогреть забитое сопло выше температуры плавления пластика и “выжечь” засор. Но впоследствии все равно сопло лучше заменить.

Низкая температура сопла

Нужно повысить температуру экструдера в настройках слайсера или проверить исправность термистора и нагревательного блока. Иногда термистор может некорректно считать температуру из-за неисправности или неправильных настроек прошивки 3D принтера.

Если проблема возникла после замены термистора - обратитесь к производителю или почитайте статьи про PID тюнинг.

Пустой экструдер

При нагревании экструдера из сопла начинает сочиться пластик. Из-за этого печатать экструдер может начинать полупустым. Из-за этого часть первого слоя не печатается. Можно продавить пластик вручную, просто протолкнув пруток в сопло. Или решить эту проблему программно – в слайсере добавить печать контура вокруг модели (одна линия).

Некоторые производители и 3D энтузиасты в начало каждого GCode добавляют печать линии на краю стола. Это сделано для того, чтобы в сопле был пластик к началу печати модели.

Механизм подачи не проталкивает пластик

Пластик проталкивает к экструдеру механизм подачи - мотор с надетой на вал специальным шкивом. Если пластик по какой-то причине не проталкивается (забито сопло, низкая температура экструдера и т.д.) то шкив “прогрызает” пруток. Нужно протолкнуть пластиковый пруток руками или отрезать поврежденный кусок.

1.4 Слоновья нога

Первые слои модели получаются более широкими выступают за границы модели. Это происходит из-за того, что верхние слои давят на первые, еще не остывшие и расплющивают их (Рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Слоновья нога

Высокая температура стола

Из-за слишком высокой температуры стола нижние слои долго остаются мягкими. Попробуйте снизить температуру стола. Снижать лучше постепенно (с шагом в 5 градусов). Можно попробовать включить обдув при печати первых слоев.

Маленький зазор между соплом и печатным столом

Если, при печати первого слоя, сопло находится слишком близко к столу то лишний пластик будет вытесняться. После нескольких слоев это будет уже не так заметно, но может привести к эффекту “слоновой ноги”.

1.5 Переэкструзия пластика

Когда материала выдавливается из сопла слишком много стенки модели получаются не гладкими, а бугристыми, с наплывами (Рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Переэкструзия пластика

Решение программное - в настройках слайсера нужно выставить коэффициент подачи материала (текучесть) на меньшее значение. Среднее значение – 95-98%.

Стоит проверить диаметр прутка. Если его размер больше 1,75, то пластика будет выдавливаться больше, чем нужно.

1.6 Недоэкструзия пластика

Пластика выдавливается слишком мало, из-за этого между слоем могут появляться щели. Готовая модель получится непрочной (Рисунок 1.6).

Неправильный диаметр нити

Проверьте в настройках слайсера диаметр нити. Иногда вместо популярного 1,75 по умолчанию установлен 2,85.



Рисунок 1.6 – Недоэкструзия пластика

Неправильные настройки коэффициента подачи

Проверьте настройки текучести в слайсере. Среднее значение должно быть 95-98%.

Забитое сопло

Что-то могло попасть в сопло и частично перекрыть выход пластику. Визуально пластик будет давиться из сопла, но в меньшем количестве чем нужно для печати.

1.7 Волосатость или паутинка на готовой модели

Из внешней стенки модели (чаще всего, с одной стороны) торчат тоненькие ниточки пластика. Дефект появляется из-за вытекания пластика из сопла при холостом перемещении (Рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Волосатость или паутинка на готовой модели

Недостаточный ретракт

Ретракт — это небольшое вытягивание пластиковой нити из экструдера. Благодаря ретракту при холостом перемещении экструдера (от слоя к слою или от модели к модели) нагретый пластик не капает из сопла. Для некоторых текучих видов пластика (например PETG) скорость и величину ретракта нужно увеличить.

"Волосатость" легко можно удалить шлифовкой или срезать ниточки острым скальпелем.

Высокая температура экструдера

Чем выше температура экструдера, тем более жидким становится пластик. Важно найти баланс что бы пластик не был слишком жидким и хорошо "слипался" по слоям.

В подборе оптимальной температуры экструдера хорошо помогает тестовая модель - башня. На ней наглядно видно, как ведет себя пластик при печати на разной температуре.

1.8 Пропуск слоев

На отпечатке видны небольшие дыры или оболочка модели получается не сплошная (Рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Пропуск слоев

Тефлоновая трубка деформировалась

Термобарьеры существуют 2 видов - цельнометаллические и с тефлоновой трубкой. При перегреве тефлоновая трубка может деформироваться. Пластик будет проходить через нее, но в меньшем количестве.

Низкая температура экструдера или высокая скорость печати

Если экструдер недостаточно нагрет, то пластик будет недостаточно жидким и просто не будет успевать продавливаться через сопло. Чем выше скорость печати, тем выше должна быть температура экструдера.

Иногда внешние стенки печатаются хорошо, а заполнение получается “рваным”. В этом случае снизьте скорость печати заполнения в слайсере.

1.9 Расслоение модели

На поверхности отпечатка во время или после печати образуются трещины. Трещины могут быть значительные или совсем небольшие. Чаще всего такая проблема возникает у пластиков с большим процентом усадки - ABS или Нейлон (Рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Расслоение модели

Резкий перепад температур

При резком перепаде температур (например сквозняк) часть модели остывает быстрее. Это приводит к неравномерности усадки и неправильному распределению внутреннего напряжения. Для пластиков с низкой усадкой это не критично. Но если процент усадки больше нескольких процентов модель может лопнуть по слоям.

Для печати такими пластиками рекомендуется использовать принтер с закрытым корпусом. Если такой возможности нет - постарайтесь максимально исключить сквозняки и резкие перепады температур в комнате, где печатает 3D принтер.

Температура печати

Из-за слишком низкой температуры печати слои могут плохо “склеиваться” друг с другом. Повысьте температуру печати в настройках слайсера.

Закалка (если модель трескается после печати)

Иногда трещины на модели появляются через несколько дней после печати. Это происходит из-за неравномерного распределения внутреннего напряжения после остывания. Можно попробовать “закалить” готовое изделие.

Для закалки модель помещают, например в духовку, и нагревают до температуры размягчения пластика. После этого нагрев выключают и оставляют медленно остывать духовку с моделью внутри. Благодаря этому напряжение внутри отпечатка распределится более равномерно. Но в этом методе очень важна точность - стоит немного ошибиться с температурой и готовое изделие может “поплыть”.

1.10 Звон

Чаще всего это выглядит как тень вокруг остро выступающих элементов модели (Рисунок 1.10).

Проблемы с механикой

Иногда проблема возникает из-за люфта экструдера. Проверьте не разболталось ли крепление экструдера к направляющим. Обязательно проверьте натяжку всех ремней.



Рисунок 1.10 – Звон

Высокая скорость печати или большие ускорения

Слишком быстрое перемещение экструдера может привести к вибрациям, из-за которых и возникает рябь на стенке модели. Чем меньше вес экструдера, тем менее заметной будет рябь. Чтобы избавиться от звона просто уменьшите скорость печати в настройках слайсера.

1.11 Провисание некоторых частей модели

Некоторые части не напечатались, сломались или вместо аккуратной поверхности получается оплывшая сопля из пластика (Рисунок 1.11).

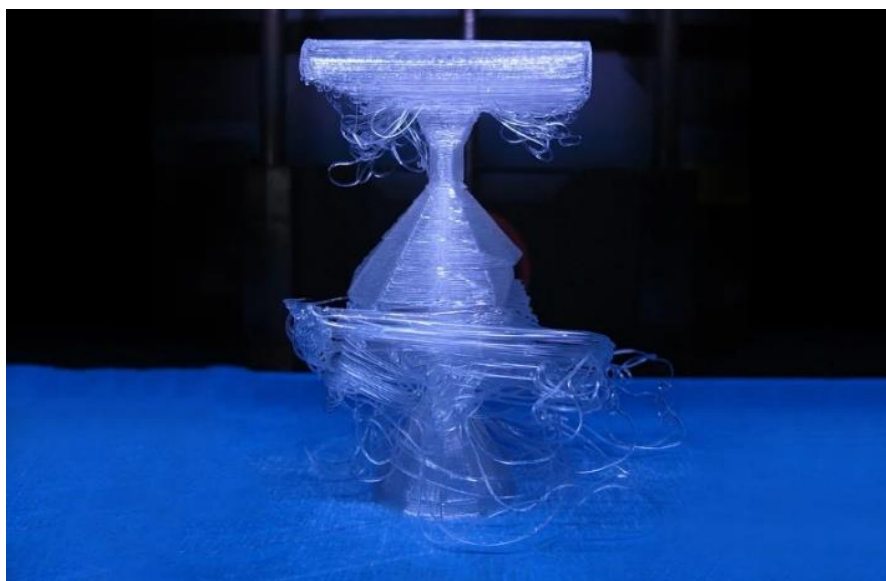


Рисунок 1.11 – Провисание некоторых частей модели

Нет поддержки для нависающих элементов

3D принтер не умеет печатать в воздухе, поэтому если в модели есть нависающие элементы нужно выставлять опоры - поддержки. Слайсер может сам выставить необходимые поддержки, нужно в настройках поставить соответствующую галочку.

При печати с растворимой поддержкой можно выставить зазор между моделью и поддержкой - 0. Так поверхность получится более гладкой. Если материал поддержки и модели одинаковый - нужно добавить небольшой зазор. Иначе будет сложно отделить поддержку от модели [5].

2 Устранение дефектов

2.1 3D-принтер

Для этого исследования использовался 3D-принтер Creality 3D Ender-3 Pro FDM с точностью печати $\pm 0,1$ мм в соответствии со спецификациями производителя.

Таблица 2.1 – Общие параметры, используемые для 3D-печати.

Параметр	Значение
Температура (°C)	217
Температура стола (°C)	60
Высота слоя (мм)	0,2
Диаметр PLA (мм)	1,75
Заполнение (%)	100
Скорость печати (мм/с)	50
Настройки вентилятора (все слои) (%)	100
Диаметр сопла (мм)	0,4

Для 3D-печати использовался материал PLA (полимолочная кислота, белый, 1,75 мм).

Все модели были напечатаны с параметрами, указанными в таблице 2.1 в MIT FabLab.

2.2 Калибровка экструдера

Первым шагом калибровки было определение скорости потока экструзии (шаги E), чтобы убедиться, что принтер экструдировать нить с правильной скоростью и избегает недо- или переэкструзии. Стандартные шаги E, указанные производителем, составляли 93 шага/мм. Для проверки скорости потока было экструдировано 50 мм нити с использованием следующей процедуры. Нить была помечена на расстоянии 50 мм от экструдера, измеренном от плоской стороны экструдера. В пользовательском интерфейсе 3D-принтера движение экструдера было установлено на 50. Экструзия была начата, и как только нить прекратила движение, была измерена разница. Расстояние между меткой и экструдером было измерено, и новое значение было определено с помощью следующей формулы:

$$E(\text{новый}) = E \times D (\text{движение экструдера}) / D (\text{расстояние}) \quad (1)$$

$$E(\text{новый}) = 93 \times 50 / (50-13) = 125.67 \text{ шагов/мм} \quad (2)$$

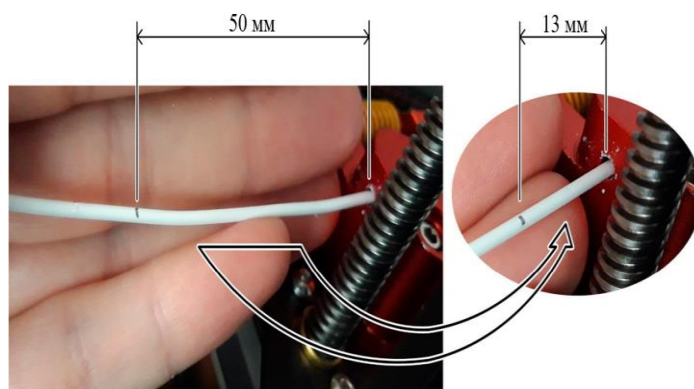


Рисунок 2.1 – Недоэкструзия

Новые установленные Е-шаги составили 125,67 шагов/мм. Процедура была повторена, и величина выдавливания была проверена и подтверждена.

2.3 Выравнивание стола

Далее была откалибрована стол принтера с целью достижения равномерного расстояния между кончиком сопла и поверхностью кровати по всему столу принтера. Платформа поддерживается четырьмя винтами с цилиндрическими пружинами. Поворачивая винты, стол можно отодвигать от сопла или к нему. Для достижения равномерного расстояния между платформой и соплом использовалась алюминиевая пластина толщиной 3 мм, и была сделана тестовая печать слоем материала толщиной 0,2 мм, чтобы убедиться, что материал равномерно выдавливается по поверхности кровати и что между слоями нет зазоров [6].

2.4 Проверка шагов осей и перекосов

Было проверено, что экструдер выполняет заданное движение в направлениях X и Y. Деталь длиной 100 мм была смоделирована и напечатана в обоих направлениях и измерена. Неровностей обнаружено не было. Все измерения проводились штангенциркулем.

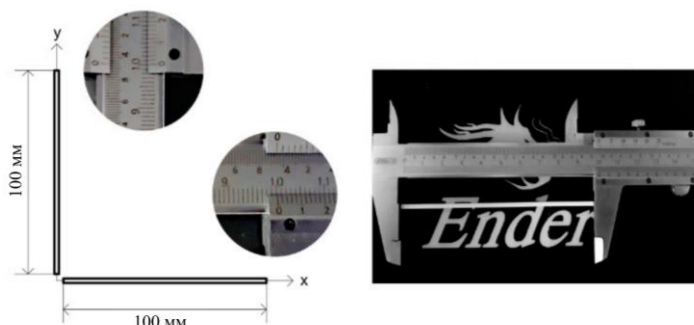


Рисунок 2.2 – Проверка движения экструдера в направлениях X и Y

3 Точность технологии FDM 3D-печати на основе полей допусков

Основным недостатком настольных FDM-принтеров является точность продукции, которая особенно ярко выражена, когда неточные по размерам и многокомпонентные печатные изделия необходимо подогнать в функциональную сборку. Исследование направлено на определение пределов точности 3D-принтеров FDM при производстве элементов для сборки с использованием 3D-принтера в системе допусков и посадок. Для этой цели был выбран набор номинальных размеров в пределах посадки с зазором, и были созданы различные САПР-модели в соответствии с системой пределов и посадок ISO 286-1:210.

Производство деталей с использованием традиционных процессов основано на четко определенных допусках, международных классах допуска (IT), типах посадки и системах посадки, в которых детали изготавливаются и собираются. Что касается технологии FDM, из литературы известно, что 3D-печать FDM может достигать следующих классов IT: IT9, IT10, IT11, IT12, IT13, а иногда в одноосевых направлениях, иногда во всех направлениях осей (IT11, IT12 и IT13) во время печати. Это также позволяет сравнивать точность с точностью традиционных производственных технологий, но все же стоит изучить, можно ли достичь более жестких зон допусков, чем те, которые установлены системой пределов и посадок ISO 286 во всех направлениях 3D-печати. Кроме того, объем, в котором может быть напечатана деталь, потенциально определяет ее геометрию и то, как она соединяется с другими элементами.

3.1 CAD-модель

После моделирования в CAD программах, объект был импортирован в программу Cura, и было проверено, распознано ли программное обеспечение объект с точными размерами модели САПР. Меню в программном обеспечении слайсера показывает размеры объекта по осям x, y и z иначе, чем в модели CAD. (Рисунок 3.1)

В частности, для измерения Ø50 мм программное обеспечение отображает 49,9965 мм по оси x и 49,9982 мм по оси y. Используя свойство масштабирования «равномерно/привязка» (лучший выбор для пользователя), была введена коррекция для обоих измерений и установлена на 50 мм. Это важно, поскольку каждое поле допуска определяет, насколько размеры объекта могут отклоняться от заданных целевых размеров без влияния программного обеспечения слайсера или преобразования модели CAD в файл STL. Однако шаг масштабирования snap не всегда необходим. Это зависит от параметров экспорта CAD в STL.

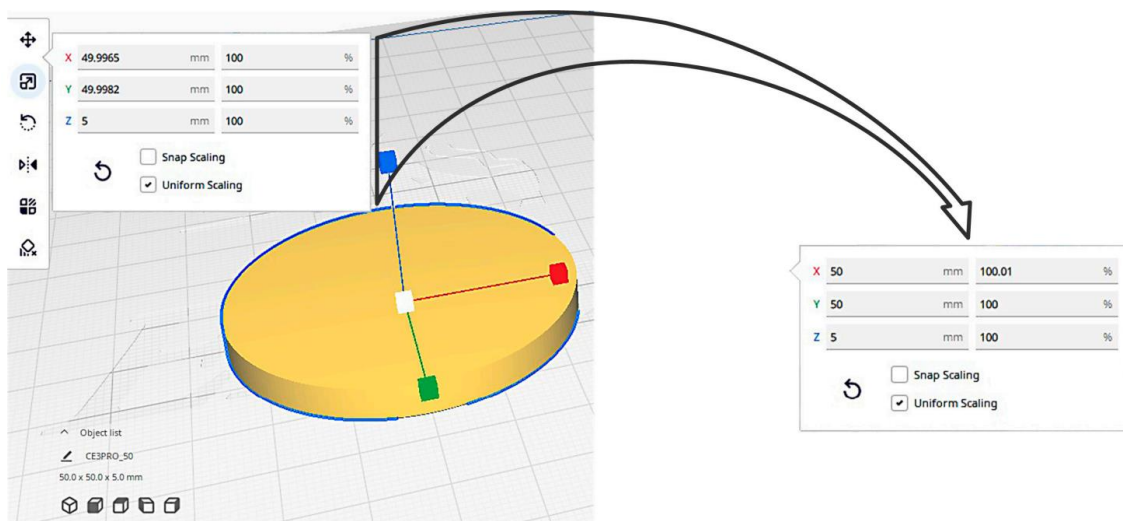


Рисунок 3.1 – Распознавание размеров в программном обеспечении слайсера до коррекции и после коррекции

Тестовая печать показала правильное измерение 50.00 мм (Рисунок 3.2). Однако эта опция доступна только в том случае, если размеры объекта являются внешними размерами. Поскольку учитывались как внешние, так и внутренние размеры, в существующую модель было добавлено отверстие диаметром 45 мм, к которому эта опция не может быть применена. Тестовая печать показала неточности во внутренних размерах объекта (44,80 мм), хотя в программное обеспечение слайсера были введены правильные значения для внешних размеров, которые снова были напечатаны точно. Поэтому следующим шагом было выполнение размерной компенсации [7].

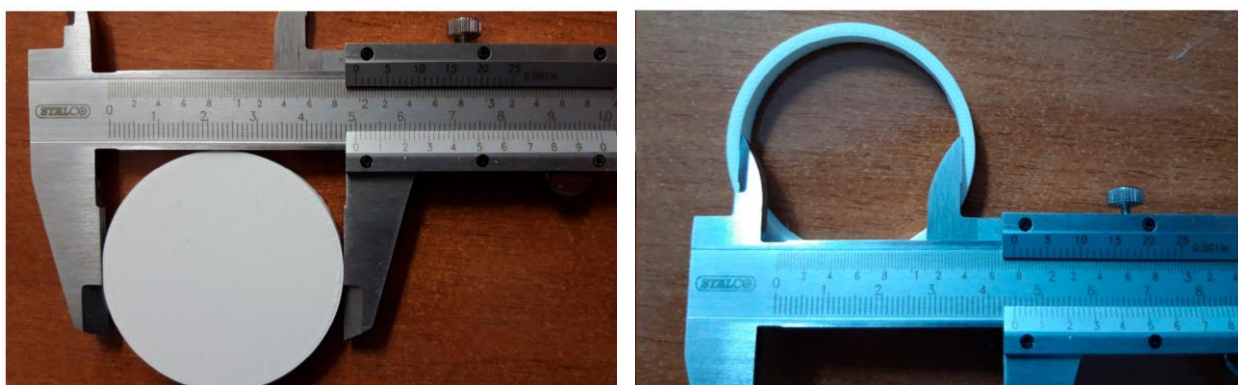


Рисунок 3.2 – Проверка допусками и зазорами для базового размера Ø35

3.2 Компенсация размеров

Параметр горизонтального расширения позволяет регулировать размер 3D-печатных деталей в направлениях X и Y для компенсации усадки материала при его охлаждении. Положительное значение не увеличивает внешние размеры напечатанной детали, когда она меньше ожидаемого из-за усадки, в то время как

отрицательное значение уменьшает внешние размеры, когда напечатанная модель больше ожидаемого. Начальное горизонтальное расширение слоя такое же, но его можно применить только к первому слою, который находится в контакте с поверхностью построения, чтобы уменьшить эффект «слоновой ноги». Горизонтальное расширение отверстия влияет на внутренние размеры напечатанной детали так же, как Горизонтальное расширение отверстия влияет на внешние размеры. Поэтому для правильной установки этих параметров использовалась та же модель CAD и первая напечатанная на 3D-печати деталь была измерена с внешними размерами Ø50 мм и внутренними размерами 44,80 мм. Эффект «слоновой ноги» возник на первом слое с размерами Ø50,64 мм. Отрицательная разница 0,2 мм в направлениях x и y была разделена на два, и первое значение было установлено на 0,1 мм. Итерации были выполнены для всех трех параметров. Потребовалось пять итераций, чтобы подтвердить значение. Следует отметить, что усадка зависит от настроек параметров процесса, а также от размеров и геометрии детали. При переносе настроек печати из калибровочной детали в функциональную часть традиционные методы компенсации усадки следуют прямолинейному подходу масштабирования входных геометрий на основе разработанных моделей перед процессом изготовления [8].

3.3 Система пределов и посадок ISO 286-1:2010

На практике применяются система базовых отверстий и система базовых валов, и предпочтение следует отдать системе базовых отверстий для облегчения обработки и измерений с внешней стороны детали машины. Поэтому в данной статье исследуется возможность соединения напечатанных деталей, которые образуют систему базовых отверстий. Качество FDM 3D-печати начинается с класса IT9 и доходит до класса IT14. Для создания посадки с зазором использовались все доступные зоны допусков вала от зоны h (минимальный зазор) до зоны a (максимальный зазор). Для расчета и анализа системы пределов и посадок использовалось программное обеспечение. Номинальный диапазон, используемый для анализа, был случайным образом установлен на уровне 30–40 мм. Основной размер, который должен был использоваться, рассчитывался следующим образом:

$$D = \sqrt{D_1 \cdot D_2} \quad (3)$$

где, D – среднее геометрическое значение, мм;

D₁; D₂ – нижнее и верхнее значения диапазона, мм.

Таким образом, D равен 34,64 мм, и он был округлен до 35 мм. Это значение было далее использовано в качестве базового размера. Для размера 35 мм базовая система отверстия, включая посадку с зазором и зоны допусков, начиная с зоны H9 для отверстия и h9 для вала, была выбрана в качестве первой возможной посадки с зазором.

После определения зон допуска и качеств отверстий и валов необходимо определить, как создать модель САД, чтобы 3D-принтер «понимал» допуски. Согласно таблице 3, для отверстия с измеренным диаметром $\varnothing 35H9$ нижнее отклонение составляет $EI = 0$ мм, а верхнее отклонение составляет $ES = 0,062$ мм, что означает, что отверстие должно быть изготовлено в этих пределах. Итак, как мы можем спроектировать отверстие и вал так, чтобы 3D-принтер изготовил деталь в этих пределах? Обычно 3D-принтер имеет диаметр сопла 0,4 мм, а высота слоя может варьироваться, но здесь она предполагается равной 0,2 мм. На практике предполагалось, что идеальная ширина слоя должна быть на 20% больше диаметра сопла — в данном случае 0,48 мм. Таким образом, когда слой печатается на 3D-принтере, площадь поперечного сечения этого слоя имеет эллиптическую форму, и когда принтер совершает полное круговое движение сопла для заданного диаметра 35 мм. Этот метод был применен ко всем другим размерам отверстий и валов. Поэтому САД-часть отверстия и вала была смоделирована как среднее арифметическое (округленное до 35 мм) минимального и максимального диаметра, разрешенного зоной допуска. Для случая $\varnothing 35H9$ это $\varnothing 35,031$ мм. САД-часть отверстия имеет произвольно выбранную толщину стенки 3,2 мм. Пример проанализированных допусков и посадок для зоны допуска H9 показан в положениях зон допуска представлены на Рисунке 3.3.

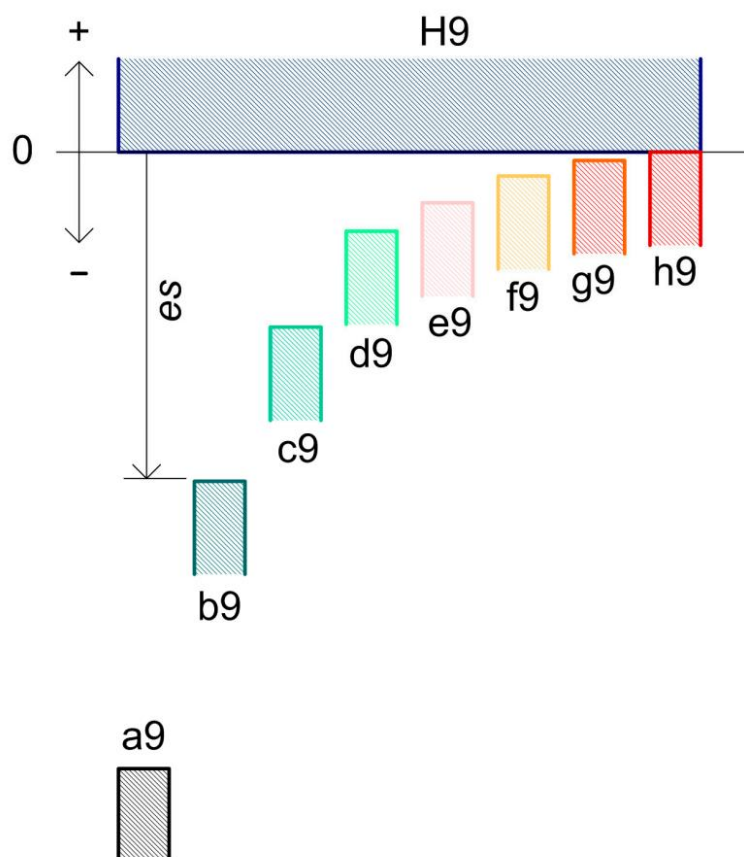


Рисунок 3.3 – Зоны допуска для посадки с зазором и IT9

3.4 Процедура бесконтактного измерения

После того, как образец был напечатан на 3D-принтере, его необходимо было измерить, чтобы определить его диаметр. Образцы измерялись с помощью предварительно откалиброванным оборудованием ON Diameter, чтобы избежать ошибок из-за контактного измерения с помощью скользящей шкалы. Чтобы уменьшить влияние ошибок измерения, каждый образец был напечатан по 8 штук. Использовалось бесконтактное измерение, чтобы избежать любого влияния на точность в случае контактных измерений, поскольку это тонкостенная конструкция, и ее очень легко деформировать. Точность приложения составляет $\pm 0,001$ мм. (Рисунок 3.4)

Ø35.042	}	Ø 35.051	Ø34.969	}	Ø34.961
Ø35.048			Ø34.960		
Ø35.039			Ø34.944		
Ø35.049			Ø34.919		
Ø35.062			Ø34.989		
Ø35.052			Ø34.949		
Ø35.058			Ø34.988		
Ø35.055			Ø34.970		

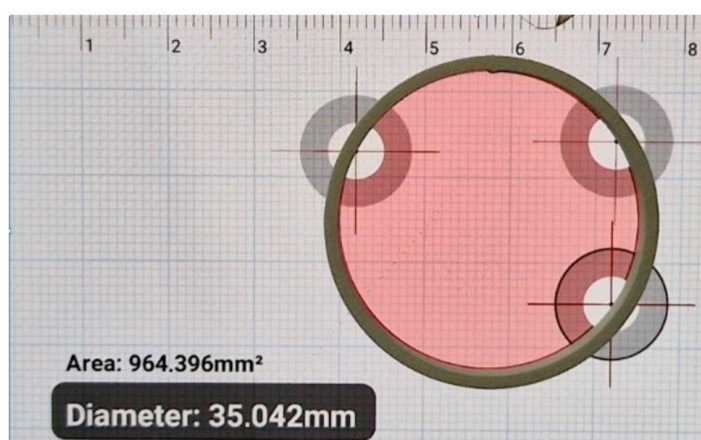


Рисунок 3.4 – Измерение образца Ø35

Все наши измерения были проанализированы для определения стандартного отклонения, минимального и максимального измеренных значений диаметра, верхнего и нижнего отклонения и допуска округлости. Общее время 3D-печати составило 1392 минут. Общее количество напечатанных деталей составило 16. Было проверено, может ли 3D-принтер достичь указанного поля допуска. Среднее значение полученных результатов измерений сравнивалось с указанным средним значением САД-модели. Результаты показали, что все зоны допуска для отверстий и валов были достигнуты, и, таким образом, была достигнута посадка с зазором. При сравнении размеров зон допусков по

стандарту ISO 286-1:2010 были достигнуты более жесткие зоны допусков, чем предписано для 3D-печати, что говорит о том, что процесс калибровки 3D-принтера был проведен правильно.

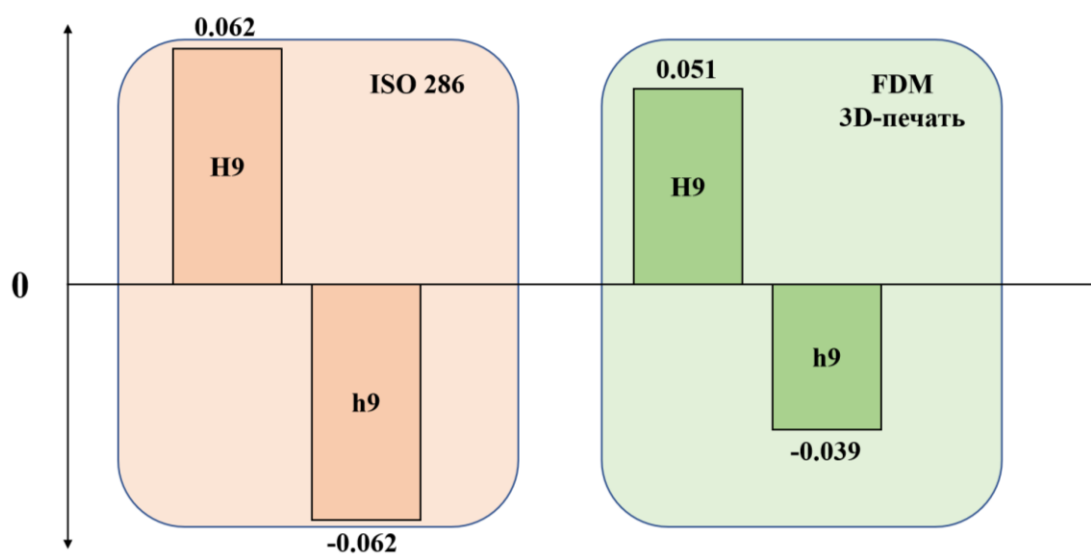


Рисунок 3.5 – Зоны допусков между ISO 286-1:210 и FDM 3D-печатью

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аддитивное производство или 3D-печать полимерных и композитных материалов предоставляет множество возможностей для проектирования и изготовления различных деталей и компонентов, особенно для деталей со сложной геометрией, целей прототипирования, изготовления деталей с низкой производительностью, а также проектирования инструментов и приспособлений. Несмотря на ценные преимущества, которые обеспечивает 3D-печать полимеров и композитных материалов, таких как FDM, структурная целостность и качество изготовленных деталей остаются основными проблемами. Понимание типа и свойств потенциальных дефектов и изъянов в 3D-печатных деталях, а также потенциальных сбоев в 3D-печатных машинах, как обсуждается в этой работе, имеет решающее значение для предотвращения производства некачественных деталей или эксплуатации оборудования в ненадлежащих условиях.

Анализы, представленные в этой дипломной работе, доказали, что возможно производить объекты с помощью FDM 3D-принтера в допустимых пределах для допуска, посадки и типа посадки. Очень важно выполнять правильную калибровку настольных FDM 3D-принтеров, поскольку качество их изготовления и сборки сомнительно. Было показано, что 3D-принтер может «понимать» размер допуска, установленный с помощью системы допусков ISO 286. Это позволяет проводить сравнение с традиционными производственными технологиями, такими как точение, фрезерование, сверление и т. д., а также сравнение с отклонениями, определенными в системе ISO 286. Также предоставляется мера допуска круглости. Такой подход может помочь решить проблемы неточности при изготовлении продукции и ограничения объема работы в недорогих FDM 3D-принтерах, что может повысить их представительство в процессе разработки и производства продукции. Однако важно отметить, что аддитивные технологии используются не только для производства конечных продуктов, но и для изготовления инструментов и форм, прототипов и деталей, которые сложно изготовить обычными методами и т. д. Поэтому аддитивные технологии по-прежнему имеют большой потенциал для применения в различных отраслях промышленности. Среди проблем, которые не были успешно решены, — возникновение «слоновых ног» во время печати первого слоя, из-за чего каждый напечатанный объект оказывается за пределами заданных размеров в своей нижней части около рабочей пластины. Изменение температуры печати или скорости печати первых слоев может быть полезным. Измерения в этой области объектов были предметом нашего анализа, поскольку мы сосредоточились на том, что могут сделать 3D-принтеры без дополнительной постобработки материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Maggie Baechle-Clayton, Elizabeth Loos, Mohammad Taheri and Hossein Taheri. Failures and Flaws in Fused Deposition Modeling (FDM) Additively Manufactured Polymers and Composites. – Journal of Composites Science, 2022.
- 2 Ivan Grgi'c, Mirko Karakaši'c, Hrvoje Glavaš and Pejo Konjati'c. Accuracy of FDM PLA Polymer 3D Printing Technology Based on Tolerance Fields. – Processes, 2023.
- 3 Mohammadreza Lalegani Dezaki, Mohd Khairul Anuar Mohd Ariffin. Influence of Infill Patterns Generated by CAD and FDM 3D Printer on Surface Roughness and Tensile Strength Properties. – Applied Sciences, 2021.
- 4 Yasaman Mohseni, Mina Mohsen. Investigating impacts of FDM printing parameters and geometrical features on void formation in 3D printed automotive components. – Materials Today: Proceedings, 2023.
- 5 Kaiser Kozhaya, Shynggys Turarbek. Convolutional Neural Network-Based Defect Detection Technique in FDM Technology. – ScienceDirect, 2023.
- 6 Грищенкова Е.С., Чурбанова Ю.А., Татаров Г.Л. Основные причины нарушения работы 3d-принтеров и способы их устранения. – Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ» № 11 (68) Том 4., 2023.
- 7 Рэдвуд Б., Шофер Ф., Гаррэт Б. 3D-печать. Практическое руководство. – пер. с англ. М. А. Райтмана. – ДМК Пресс, 2020.
- 8 Дефекты 3D печати. Проблемы 3D принтеров: причины и решения — URL: <https://3dradar.ru/post/607/>, 2023.