

ІТМО

И.Ю. Кинжагулов, О.А. Колганов, Г.Д. Попов
АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЦИФРОВОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ



Санкт-Петербург
2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

И.Ю. Кинжагулов, О.А. Колганов, Г.Д. Попов
АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЦИФРОВОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.03.01 Приборостроение
в качестве Учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования бакалавриата

ИТМО

Санкт-Петербург
2024

Кинжагулов И.Ю., Колганов О.А., Попов Г.Д., Аддитивные технологии в цифровом производстве— СПб: Университет ИТМО, 2024. – 58 с.

Рецензент(ы):

Федоров Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор (квалификационная категория "профессор практики") факультета систем управления и робототехники, Университета ИТМО.

В учебном пособии рассматриваются основные положения аддитивных технологий и методы испытания изделий, полученных с применением аддитивных технологий. Изложены вопросы подготовки цифровых моделей к изготовлению в аддитивном производстве с помощью технологий FDM и SLA. Учебное пособие предназначено для студентов-бакалавров, обучающихся по дисциплине "Аддитивные технологии в цифровом производстве" по направлению подготовки "Приборостроение". Учебное пособие состоит из трех глав. Первая глава посвящена основным положениям технологии FDM, таким как: принципы работы технологии FDM, цифровые инструменты подготовки моделей деталей к изготовлению, конструктивные особенности средств 3D-печати, параметры печати, используемые материалы, их свойства. Во второй главе рассматриваются методы испытания на прочность изделий, полученных с применением аддитивных технологий, а именно: физические основы испытаний на прочность, прочностные характеристики изделий, влияние на них параметров печати. В третьей главе рассматриваются основные положения технологии SLA, такие как: принципы работы технологии SLA, цифровые инструменты подготовки моделей деталей к изготовлению, конструктивные особенности средств 3D-печати, параметры печати, используемые материалы, их свойства. Затрагиваются возникающие в процессе аддитивного производства проблемы и способы их решения.



ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, научно-образовательная корпорация. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию. Приоритетные направления: ИТ и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Лидер федеральной программы «Приоритет-2030», в рамках которой реализуется программа «Университет открытого кода». С 2022 ИТМО работает в рамках новой модели развития — научно-образовательной корпорации. В ее основе академическая свобода, поддержка начинаний студентов и сотрудников, распределенная система управления, приверженность открытому коду, бизнес-подходы к организации работы. Образование в университете основано на выборе индивидуальной траектории для каждого студента.

ИТМО пять лет подряд — в сотне лучших в области Automation & Control (кибернетика) Шанхайского рейтинга. По версии SuperJob занимает первое место в Петербурге и второе в России по уровню зарплат выпускников в сфере ИТ. Университет в топе международных рейтингов среди российских вузов. Входит в топ-5 российских университетов по качеству приема на бюджетные места. Рекордсмен по поступлению олимпиадников в Петербурге. С 2019 года ИТМО самостоятельно присуждает ученые степени кандидата и доктора наук.

© Университет ИТМО, 2024

© Кинжагулов И.Ю., Колганов О.А., Попов Г.Д., 2024

Содержание

Введение.....	4
Инструкция по охране труда при проведении лабораторных работ.....	5
1. Изучение возможностей программного обеспечения для 3D-печати по технологии FDM.....	6
2. Исследование предела прочности образцов, изготовленных с помощью аддитивных технологий (FDM) из различных типов материалов.....	25
3. Изучение возможностей программного обеспечения для 3D-печати по технологии SLA.....	33
Список литературы.....	41

Введение

На сегодняшний день изделия, выполненные по аддитивным технологиям, находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Технологии аддитивного производства строятся на изготовлении изделий путем послойного добавления материала, что позволяет выполнять сложнопрофильные изделия. В настоящее время в обрабатывающей промышленности аддитивные технологии приходят на смену классическим технологиям механообработки, штамповки, литья. Аддитивные технологии, также известные как 3D-печать, уже не новинка в промышленности. Эти инновационные технологии позволяют создавать изделия посредством послойного нанесения материала, в результате чего происходит постепенное образование трехмерного объекта.

Данное методическое пособие предназначено для студентов-бакалавров, обучающихся по дисциплине "Аддитивные технологии в цифровом производстве" по направлению подготовки "Приборостроение". Пособие содержит теоретические сведения о технологиях FDM и SLA, а также о механических свойствах изделий, получаемых с помощью аддитивных технологий. Помимо теоретических сведений, в методическом пособии представлены практические рекомендации для подготовки моделей к 3D-печати с примерами. После самостоятельного изучения теоретических сведений и практических рекомендаций, студентам предлагается выполнить лабораторные работы по изученным темам. Порядок выполнения лабораторных работ и требования к содержанию отчета о проделанной работе представлены в конце каждой главы.

Предполагается, что студенты в качестве входных знаний должны иметь знания об аналитической геометрии и операционных системах, а также уметь работать с системами автоматизированного проектирования (САПР). В результате изучения предложенных тем и выполнения лабораторных работ студенты получают знания о технологиях и оборудовании аддитивного производства и сферах его применения, а также научатся работать с ПО для 3D-печати и проектировать изделия для аддитивного производства. Студенты получают навык выбора материала для изделий аддитивного производства и применения аддитивных технологий для нужд приборостроения.

Инструкция по охране труда при проведении лабораторных работ

Общие требования безопасности

Допуск студентов к лабораторным занятиям производится только после инструктажа по технике безопасности, о чем делается соответствующая запись в специальном журнале (бланке).

Требования безопасности перед началом работы

1. Внимательно изучить содержание и порядок проведения лабораторной работы, а также безопасные приемы его выполнения.
2. Перед каждым включением оборудования предварительно убедиться, что его пуск безопасен.

Требования безопасности во время работы

1. Точно выполнять все указания преподавателя.
2. Не прикасаться к находящимся под напряжением элементам электрических цепей, к корпусам стационарного электрооборудования.
3. Запрещается во время работы оборудования снимать ограждения и предохранительные устройства, а также держать их открытыми.
4. Во время работы запрещается касаться руками нагретых, вращающихся и перемещающихся частей, вводить руки в зону движения.

Требования безопасности по окончании работы

1. Полностью выключить оборудование.
2. Привести в порядок рабочее место.
3. Предупредить преподавателя обо всех, даже малейших и незначительных, неисправностях оборудования.

Требования безопасности в аварийных ситуациях

1. В случае травмирования кого-либо немедленно доложить преподавателю.
2. При выходе оборудования из строя необходимо: – отключить оборудование (обесточить); – доложить преподавателю о случившемся, а в случае возгорания приступить к немедленной его ликвидации первичными средствами пожаротушения.

1. Изучение возможностей программного обеспечения для 3D-печати по технологии FDM

Цель работы: Изучение основ работы с программным обеспечением для 3D-печати по технологии FDM.

1.1. Основы технологии FDM

Аддитивные технологии производства, также известные как 3D-печать, представляют собой группу процессов, при которых объекты создаются путем добавления материала послойно (этот процесс также называют «выращивание») на основе компьютерной 3D-модели. Основное отличие аддитивных технологий от других традиционных технологий заключается в том, что новое изделие выстраивается из аморфного расходного материала вместо обработки или деформации уже имеющейся заготовки. Исходя из принципа работы, аддитивные технологии имеют ряд преимуществ и недостатков перед традиционными технологиями производства.

Общая схема применения аддитивных технологий состоит из следующих этапов:

- Подготовка САD-модели;
- Разделение модели на слои;
- 3D-печать;
- Финишная обработка.

На начальном этапе развития аддитивных технологий в производстве работа велась преимущественно с полимерными материалами. Современные средства для 3D-печати способны работать с разнообразными материалами, в числе которых композитные порошки, инженерные пластики, металлы, керамика и др. Аддитивные технологии широко применяются как для производства деталей в машиностроении, авиационной и автомобильной промышленности, литейном производстве и ряде других отраслей промышленности, так и для быстрого прототипирования.

Преимущества аддитивных технологий заключаются в высокой скорости проектирования и мобильность производства, гибкости проектирования и возможность изготовления деталей сложной формы, эффективном расходовании материала и улучшении свойств готовых изделий.

Таким образом, аддитивные технологии позволяют за короткий промежуток времени разрабатывать и изготавливать детали сложных форм с большой экономией материала в сравнении с традиционными производственными технологиями. Процесс доработки и повторного изготовления прототипов и опытных образцов существенно упрощается и удешевляется, а средства 3D-печати являются гибкими в настройке и простыми в обслуживании. При этом свойства напечатанных изделий не уступают свойствам аналогов, получаемых традиционными производственными технологиями, и даже могут превосходить их.

Несмотря на все преимущества, аддитивные технологии имеют следующие ограничения:

- низкая скорость печати накладывает ограничения на применение аддитивных технологий для крупных объектов и в условиях крупносерийного производства,
- некоторые из применяемых материалов сильно уступают в механических свойствах традиционным материалам,
- в некоторых случаях создание сложных и тонких структур может быть затруднено.

Существует множество аддитивных технологий, которые применяются в настоящее время. Одной из наиболее распространённых является FDM-печать. Данная технология основана на послойном нанесении расплавленного термопластичного материала.

В процессе печати по технологии FDM происходит экструзия материала: нить из термопластического материала (филамента) подаётся в экструдер и нагревается до температуры плавления. Расплавленный материал выдавливается на платформу, после чего остывает и затвердевает. Экструдер закреплён на трёхосевой системе перемещения, которая позволяет наносить расплавленный материал по определённой траектории [5]. Таким образом, деталь печатается послойно и в конце печати отделяется от платформы. В процессе печати могут быть созданы дополнительные конструкции (поддержки), которые удаляются после окончания печати, но они необходимы для нанесения последних слоев детали. Схема FDM-печати представлена на рисунке 1.

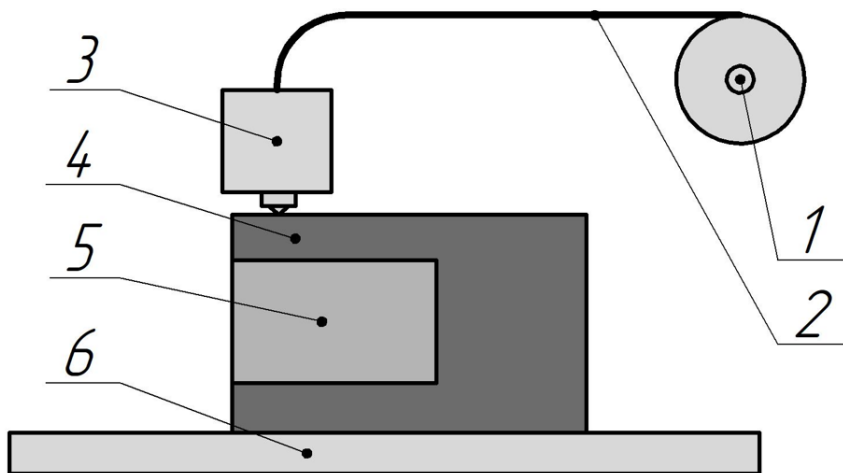


Рисунок 1 – Схема FDM-печати:

- 1 – катушка филамента; 2 – филамент; 3 – экструдер;
4 – деталь; 5 – поддержки; 6 – платформа

Технология FDM обладает рядом преимуществ:

- оборудование для FDM-печати обладает широкой доступностью, простотой и относительной дешевизной в обслуживании,
- широкий выбор доступных материалов филамента,
- технология относительно проста в реализации.

При работе с технологией FDM следует помнить о недостатках, завязанных на принципах её работы. Детали, полученные с помощью FDM, могут уступать в качестве поверхности в сравнении с другими аддитивными технологиями: на готовом изделии могут быть видимые слои, наблюдаться ступенчатость. Для улучшения качества поверхности можно изменить конфигурацию печати или применить дополнительную обработку. Также FDM-печать обладает не самой высокой скоростью, а прочность изделий может уступать другим аддитивным технологиям.

Несмотря на все недостатки, технология FDM получила широкое распространение из-за своей доступности и универсальности, FDM-печать используется для прототипирования, производства готовых деталей, обучения основам 3D-печати.

1.2. Инструменты для подготовки моделей деталей к изготовлению по технологии FDM

Для работы с FDM-печатью необходимо использование средств компьютерного моделирования. Подготовка моделей к изготовлению состоит из двух этапов: подготовка САД-модели; слайсинг и подготовка задания на печать.

Для создания САД-модели подойдёт любая САПР, поддерживающая функции 3D-моделирования. Модель может быть как разработанной, так и отсканированной с конкретного изделия. Для этого существуют специальные сканеры, которые позволяют после предварительной калибровки и настройки создать цифровую 3D-модель с реального объекта. После предварительной подготовки модель можно использовать для формирования задания на печать.

Поскольку технология FDM подразумевает послойную печать модели, САД-модель необходимо разделить на слои, т.е. осуществить операцию слайсинга. Траектория движения экструдера в пределах слоев описывается в трехмерном пространстве, поэтому 3D-принтеры имеют систему управления, основанную на G-кодах аналогично системам управления в станках с ЧПУ. Для создания задания на печать в формате G-кода существует специальное ПО, которое и получило название слайсер. Программа работает с САД-моделями в подходящем формате (например, STL). Для генерации G-кода необходимо загрузить модель и настроить параметры печати (рисунок 2).

Существует множество различных слайсеров, которые разработаны различными производителями оборудования для аддитивных технологий или разработчиками специального ПО. Несмотря на различия в интерфейсе и отдельных функциях, большинство настраиваемых параметров и алгоритм работы со слайсерами аналогичны.

Перед загрузкой модели следует задать параметры 3D-принтера. Чаще всего параметры загружаются автоматически, для этого следует выбрать используемую модель принтера в каталоге. Затем САД-модель необходимо загрузить в слайсер и расположить на платформе (дополнительно можно разместить сразу несколько изделий в контексте одного задания на печать). На данном этапе можно поменять расположение, масштаб модели, развернуть вокруг одной из осей.

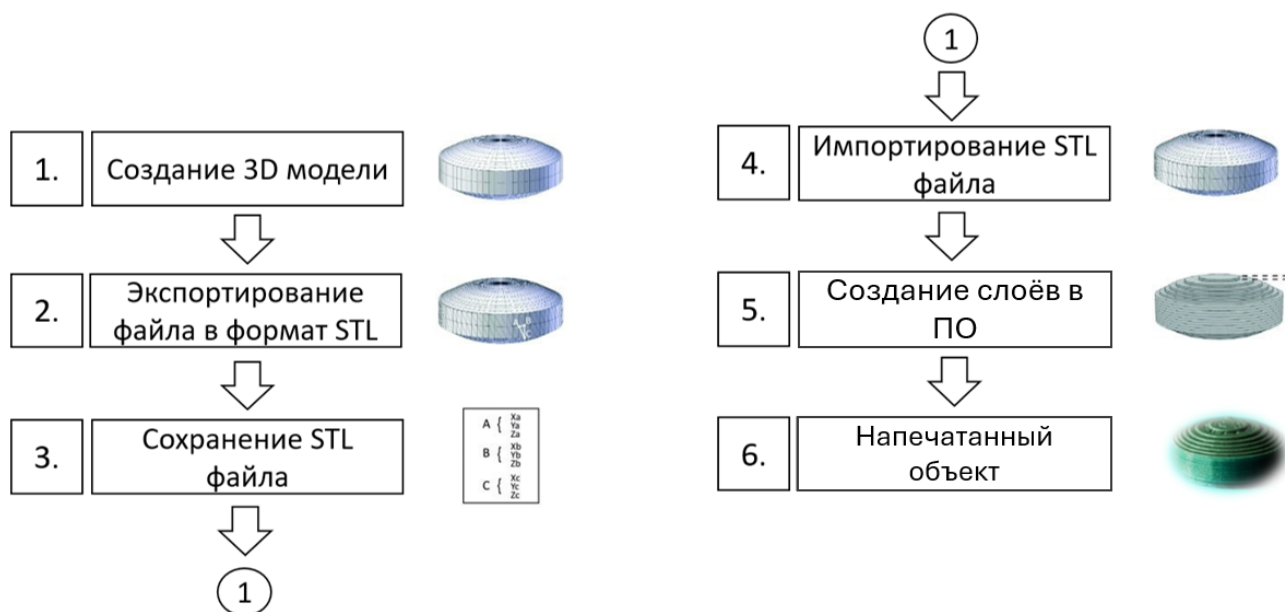


Рисунок 2 – Этапность подготовки модели к 3D-печати по технологии FDM

Далее необходимо задать параметры печати. Параметры заполнения отвечают за плотность заполнения и шаблон, по которому слой будет заполняться. Параметры материала позволяют регулировать температуру стола и сопла (чаще всего в слайсерах есть готовая библиотека материалов, либо можно ввести параметры вручную), это делается для качественного остывания и затвердевания печатаемых слоев. В ряде случаев обосновано изменение скорости печати, параметров перемещения сопла и параметров охлаждения – подбор параметров с использованием справочных рекомендаций или опытным путем позволяет добиваться лучшего качества печати либо ускорить процесс изготовления детали. Особое внимание стоит уделить поддержкам – грамотная их настройка позволяет избежать проблем при печати деталей сложной формы, включающих навесные элементы, тонкие стенки и большие полости. Для этого достаточно настроить несколько параметров, сами поддержки слайсер сгенерирует автоматически.

После настройки параметров печати происходит генерация G-кода. Слайсер отрисует модель напечатанной детали с поддержками, а также представит расчетные данные о времени печати и расходе филамента. Сгенерированный G-код сохраняется в файл и передается на 3D-принтер, например, с помощью внешнего носителя данных.

Примерами распространённых слайсеров являются Ultimaker Cura и Orca Slicer. Также существует множество слайсеров, разработанных производителями 3D-принтеров и предназначенными преимущественно для работы с их оборудованием, например, Anycubic Slicer.

1.3. Конструктивные особенности 3D принтеров при печати по технологии FDM

Оборудование для 3D печати по технологии FDM имеет различные конструктивные решения, как механической части, обеспечивающие позиционирование печатной головы, так и для совершенствования самой технологии. Однако стоит отметить, что принципиально 3D принтер можно разбить на основные составные части, которые обеспечивают подачу и нагрев филамента, обратную связь и другой функционал необходимый для изготовления деталей (рисунок 3).

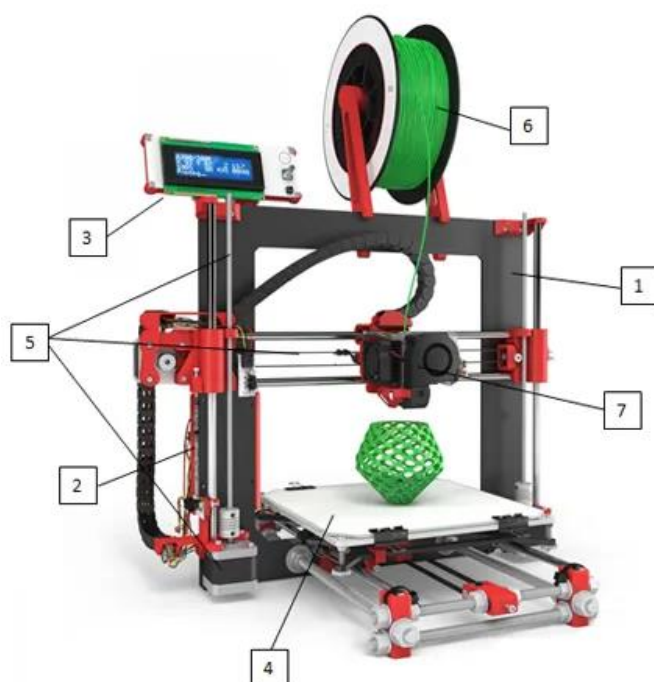


Рисунок 3 – Устройство FDM-принтера:

1 – каркас принтера; 2 – электроника; 3 – панель управления принтером; 4 – стол для печати; 5 – оси, зубчатые ремни, привод; 6 – крепление для катушки с пластиком; 7 – экструдер.

Для каждого узла 3D принтера существует несколько исполнений, например камера принтера бывает открытым и закрытым. Электроника чаще всего совмещена с панелью управления (3), однако конкретно на примере (рисунок 3) закреплены отдельно, панель управления принтером – плата с дисплеем и кнопками, является составляющей частью электроники принтера. Стол для печати необходим для создания готового изделия, может быть подогреваемым (для лучшего сцепления модели с поверхностью стола). Оси, зубчатые ремни, привод – с помощью них происходит перемещение печатающего узла. Конструкции оборудования для печати может быть с неподвижным или подвижным столом.

Печатная голова является ответственным узлом 3D-принтера, который фиксирует и осуществляет подачу филамента в нагревательный блок. Печатающая головка 3D-принтера состоит из двух частей:

1. Экструдер (cold-end) — механизм, ответственный за подачу материала в нагреватель.

2. Нагреватель (hot-end) — составная часть печатающей головки, которая отвечает за плавку и выдавливание пластиковой нити через отверстие сопла, диаметр которого может варьироваться от 0,14 до 1,20 мм [9].

Конструктивно 3D принтер может включать в себя несколько печатных голов, которые предназначены для использования различного материала при печати.

В настоящее время в 3D принтерах для печати по технологии FDM используются два исполнения экструдера:

- Экструдер Direct;
- Экструдер Bowden.

Система прямой подачи экструзии, или Direct экструдер находится непосредственно на печатной голове и осуществляет подачу филамента прямо в хотэнд. Данная система обладает высокой надёжностью, возможностью более лёгкого осуществления ретракции и менее жёсткими требованиями к конструкции – для реализации Direct системы можно использовать менее мощный мотор. К недостаткам данной системы относятся повышенные вибрации из-за увеличенного веса и затруднённое обслуживание из-за усложнённой конструкции.

Альтернативой Direct экструзии является Bowden система. В её реализации механизм подачи вынесен за пределы экструдера и крепится на корпус принтера, он толкает филамент в экструдер через длинную трубку. Основное преимущество данной системы – уменьшенный вес печатной головки, благодаря чему скорость движения каретки увеличивается, печать становится тише, а качество печати возрастает. В зависимости от конструкции принтера данная система позволяет обеспечить большую область печати. За свои преимущества система Bowden расплачивается недостатками, в числе которых необходимость применения более мощного тянущего привода, а также более медленное время отклика. Трение, возникающее в трубке, приводит к некоторой задержке движения нити между механизмом подачи и соплом, т.е. такой механизм будет требовать больших ускорений в экструзии и ретракции для избегания образования тонких натянутых на модель нитей [20]. На рисунке 4 представлена иллюстрация видов экструдеров.

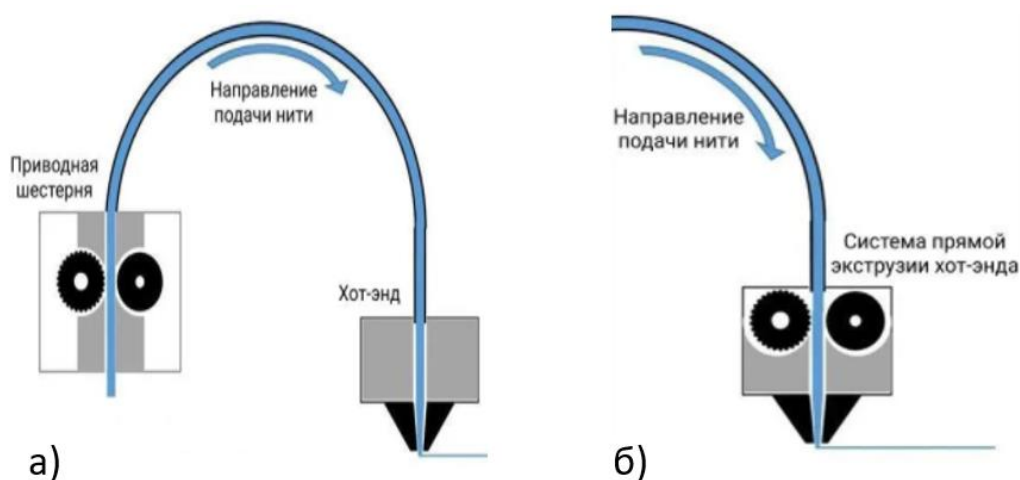


Рисунок 4 – Иллюстрация принципа работы экструдера:
а) Bowden; б) Direct.

На следующем этапе филамент поступает в нагреватель (hot-end), который расположен в печатной голове 3D принтера. Конструкция нагревателя представлена рисунке 5.



Рисунок 5 – Иллюстрация конструкции нагревателя:
а) фотография; б) трехмерная модель (разрез)

Рассматривая принцип работы нагревателя (хотенда) необходимо выделить две основные зоны: холодная зона и горячая зона. На рисунке 6 представлена визуализация выделенных зон хотенда.

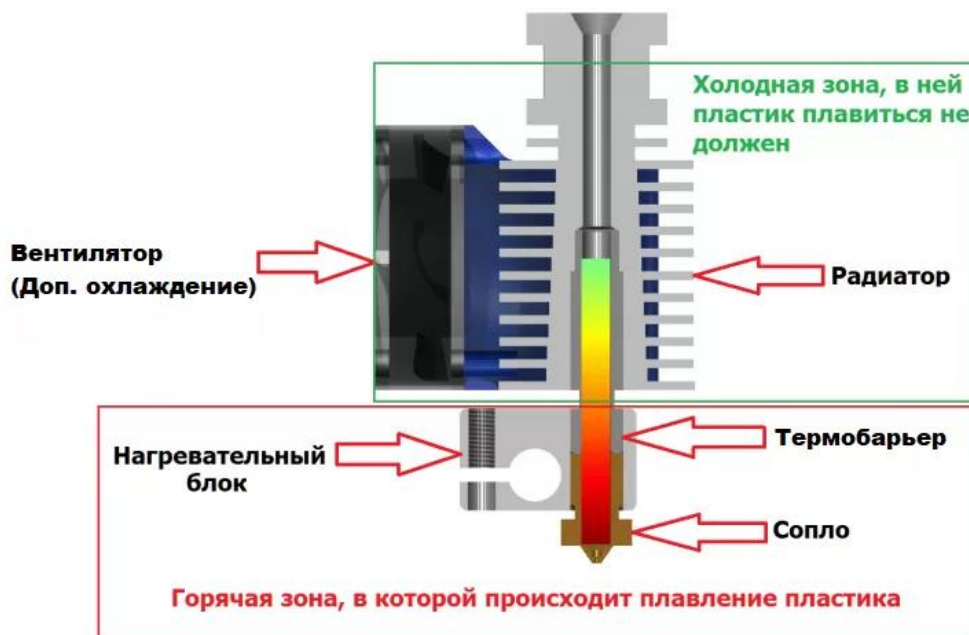


Рисунок 6 – Визуализация зон хотенда

Радиатор, находящийся в холодной зоне, предназначен для отведения лишнего тепла, также как и вентилятор, который дополнительно отводит лишнее тепло.

Термобарьер отделяет зону нагрева филамента с целью избежать преждевременного расплавления. Нагревательный блок, который находится в горячей зоне, нагревает филамент до температуры плавления. Сопло предназначено для нанесения расплавленного филамента на рабочую область с необходимой шириной линии.

Плавление пластика происходит в сопле, а на выходе получается расплавленная нить с диаметром, равным диаметру выходного отверстия сопла (рисунок 7). Как правило, сопла изготавливают из латуни, но существуют и специализированные сопла из закалённой стали. Самый распространенный диаметр сопла 0,4 мм, но бывают и другие: от 0,1 мм до 1,2 мм. Чем меньше диаметр сопла, тем выше качество распечатанных моделей, но тем больше времени требуется для печати. Выбор оптимального диаметра осуществляется в зависимости от задач [4].



Рисунок 7 – Внешний вид сопла

На какие параметры сопла требуется обратить внимание при выборе экструдера:

1. Возможность быстрой замены сопла;
2. Диаметр выходного отверстия должен соответствовать действительности;
3. Внутренний канал сопла должен быть без заусенцев (финишная постобработка/полировка канала);
4. Качественная резьба завинчиваемой части (чтобы исключить протекания пластика).

Нагревательный блок используется для фиксации нагревательного элемента (который непосредственно нагревает блок), датчика температуры (термистора или термопары), который контролирует температуру хотенда, сопла и термобарьера.

На какие параметры нагревательного блока требуется обратить внимание при выборе экструдера:

- Возможность легко устанавливать нагревательный элемент и термистор;
- Нагревательный блок должен иметь достаточную высоту относительно сопла, чтобы равномерно его прогреть;
- Мощности нагревательного элемента должно хватать, чтобы прогреть сопло до необходимой температуры (обычно хватает 40 Вт)

Качество и скорость печати напрямую зависят от типа кинематики принтера, поэтому выбор подходящей системы является ключевым аспектом для достижения оптимальных результатов [7].

Картезианская кинематика — это самая распространенная система в FDM 3D-принтерах. Она получила свое название благодаря использованию декартовых координат для перемещения печатающей головки. В этой системе оси X, Y, и Z перемещаются перпендикулярно друг другу, что обеспечивает высокую точность и простоту в управлении. Преимуществами картезианской кинематики являются легкость калибровки, простота конструкции и возможность точного контроля положения печатающей головки. Однако большие размеры и масса подвижных частей могут снижать скорость печати и увеличивать вибрации, особенно на высоких скоростях. К картезианской кинематике относятся CoreXY, H-Bot, Prusia и вариации Prusa типа консольных 3D принтеров.

Кинематическая схема **CoreXY** является модификацией картезианской системы, предлагая улучшенную скорость и точность за счет более сложной передачи движения. В системе CoreXY движение по осям X и Y достигается путем синхронной работы двух моторов, что позволяет уменьшить инерцию и повысить скорость печати. Эта система также обладает хорошей масштабируемостью и позволяет создавать принтеры с большим рабочим объемом без значительного увеличения вибраций и потери точности.

H-Bot кинематика представляет собой вариацию системы CoreXY, где перемещение по осям X и Y осуществляется с помощью одного движущего ремня. Это обеспечивает простоту конструкции и уменьшение веса подвижных частей. Несмотря на свою эффективность в некоторых приложениях, система H-Bot может страдать от проблем с точностью из-за упругости и деформации ремня при высоких скоростях печати.

Кинематика **Prusia**, на первый взгляд, похожа на Core XY и H-Bot, печатающая голова перемещается по осям X и Y, а стол 3d принтера перемещается по вертикальной оси Z. Её отличие в том, что для осей X и Y используются разные ремни и шаговые двигатели. Один шаговый двигатель перемещается по оси Y вместе с кареткой экструдера, он отвечает за перемещение печатающей головы по оси X, контролируя их через отдельный зубчатый ремень. А за перемещения по оси Y отвечает другой шаговый двигатель и своя система ремней.

Дельта-кинематика отличается от картезианской своей уникальной структурой, где три параллельных рычага управляют положением печатающей головки. Эта система позволяет достигать высокой скорости печати и уменьшает количество движущихся масс, что снижает вибрации. Конструкция дельта-принтеров сложнее в настройке и калибровке, а также требует более сложного программного обеспечения для управления.

Портальные системы представляют собой неподвижную раму с подвижным порталом, на котором расположена печатающая головка. Такая конфигурация обеспечивает стабильность и масштабируемость, что делает ее подходящей для широкоформатных принтеров. Портальная кинематика обычно используется в

промышленных условиях, где основное внимание уделяется изготовлению больших отпечатков с высокой точностью.

5D принтер – пятиосевое устройство, которое позволяет наклонять и вращать деталь в процессе ее производства, и в этом ее основное визуальное отличие от 3D-принтеров. Детали при этом получаются в четыре раза прочнее, чем изготовленные на стандартных 3D-принтерах, время производства сокращается. Технология применима в совершенно разных отраслях: авиации, автомобилестроении, протезировании, строительстве [22].

Слой и положения нитей пластика в модели теперь могут быть расположены не параллельно, а многими другими способами. Это позволяет получать напечатанные модели с в разы более высокой прочностью. Помимо этого, благодаря возможности продолжать печать буквально сбоку модели, есть возможность избавиться от огромного количества поддерживающих структур, которые в 3D-принтерах необходимо печатать параллельно с деталью для того, чтобы сохранить нужную геометрию результата печати. Одновременное использование пяти осей позволяет без особых технических сложностей получать напечатанные модели намного более сложной геометрической формы, если сравнивать с классическими 3D принтерами.

Таблица 1 – Преимущества и недостатки кинематических схем

Кинематические схемы	Преимущества	Недостатки	Примеры реализации
CoreXY	Скорость и точность, компактность	Сложность в регулировке и ограничения в производительности по мере износа	Creality3D K1 Bambu lab P1S
H-Bot	Простота, высокая скорость печати	Уменьшенная точность при высокой скорости печати	Creality3D Ender-4
Кинематика «Makerbot»	Возможность высокоскоростной печати с большой площадью	Уменьшенная точность и качество печати при высокой скорости печати	Makerbot Replicator Flying Bear Ghost 5
Дельта-кинематика	Очень высокая скорость и большая площадь	Сложная калибровка и обслуживание, снижение точности, особенно на краях области сборки	Anycubic Kossel FLSUN S1
Портальная кинематика	Стабильность и масштабируемость, высокая точность	Сложность в калибровке, настройке и обслуживании	Total Z G5
Пятиосевые принтеры	Увеличенная скорость печати, возможность печати деталей более сложной конфигурации	Сложность в настройке, высокая стоимость, сложность настройки ПО	Stereotech 530 Fiber

Очень часто принтеры оснащаются открытой камерой для печати. Основные материалы для печати в открытой камере — PETG и PLA, так как они хорошо переносят сквозняки и имеют низкую усадку.

Однако очень часто необходимо использовать закрытые камеры. Температура внутри такой камеры обычно такая же, как снаружи, или чуть теплее. Хорошо защищает изделие от сквозняков, пыли и мусора, гарантирует безопасность пользователей, обеспечивает более стабильную печать и меньшее количество ошибок. В некоторых FDM-принтерах закрытые камеры оснащены подогревом. Камера с пассивным подогревом утеплена и создает стабильную температуру внутри принтера, что снижает риск деформации материала, улучшает адгезию слоев, минимизирует количество брака. Камера с активным подогревом помимо стандартного утепления имеет дополнительный источник тепла. Основная задача — печать полноразмерных деталей тугоплавкими пластиками [10].

1.4. Особенности настройки параметров печати

Расположение на рабочем столе. От расположения модели на рабочем столе зависит ее прочность. Распределение нагрузки должно осуществляться поперек слоев печати, но не вдоль. В противном случае слои разойдутся, поскольку между ними не будет 100%-ного сцепления [23]. Также следует принять во внимание, что различное расположение детали может повлиять на время печати. В зависимости от ситуации, будет целесообразно расположить деталь в высоту или наоборот – вдоль поверхности стола. Большинство «слайсеров» позволяют получить расчетное время печати детали. Однако при выборе расположения в первую очередь следует опираться на распределение нагрузки и удобство печати сложных форм (отвесные элементы, элементы под углом), а не на время печати.

Толщина слоя. Чем тоньше слой, тем выше разрешение, а значит, тем более мелкие детали и более гладкие поверхности может воспроизводить 3D-принтер. Толщину слоя и высоту сопла можно задать для каждого изделия индивидуально (рисунок 8). Большинство современных FDM-принтеров работают в диапазоне слоев 50–150 микрон. Для больших проектов используют увеличенную высоту слоя — вплоть до 1–2 мм. Важно понимать, что тонкие слои могут быть чувствительны к неровностям платформы, неправильной калибровке принтера и несовершенствам материала. Кроме того, уменьшение толщины слоя может значительно увеличить время печати.

Скорость печати. Скорость печати FDM-принтера измеряется в миллиметрах в секунду (мм/с) и определяется скоростью перемещения печатающей головки или экструдера во время печати. Это измерение отражает скорость движения экструзионного механизма принтера вдоль всех трех осей (X, Y и Z) во время создания каждого слоя изделия. В среднем скорость печати FDM-принтера находится в пределах 40-150 мм/с. Обычно более высокое качество печати требует более медленной скорости. Сложные модели с большим количеством деталей или перемещений печатающей головки могут требовать более медленной скорости для обеспечения точности. Различные настройки принтера, такие как скорость

перемещения, скорость заполнения и скорость первого слоя, могут влиять на общую скорость печати.

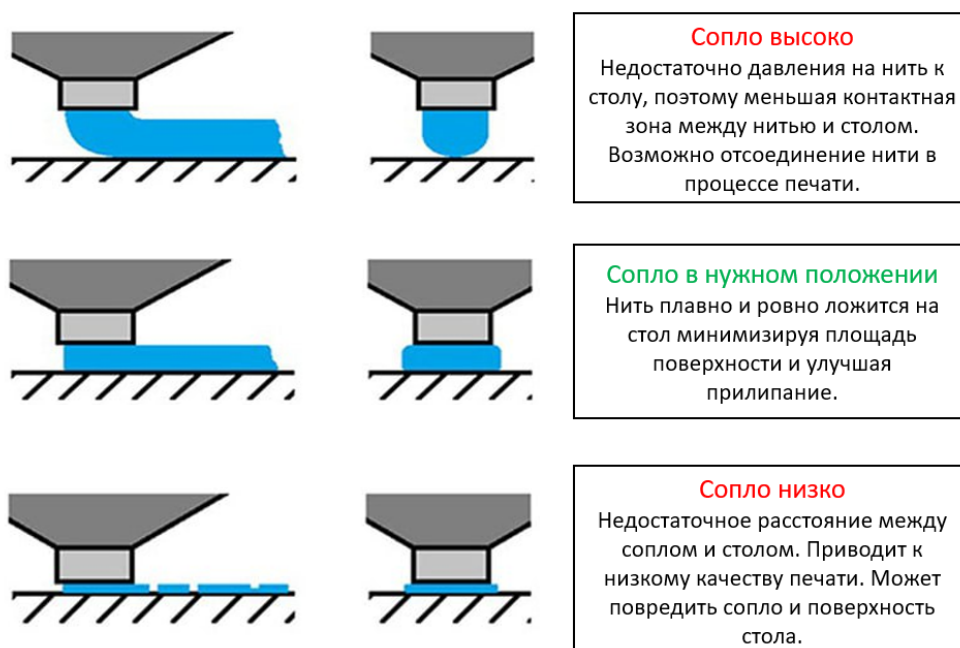


Рисунок 8 – Иллюстрация расположения сопла относительно поверхности стола

Настройка температуры или охлаждения. Пластик по мере охлаждения сжимается (в 3D-печати это принято называть усадкой). Для наглядности представьте себе, что вы печатаете ABS пластиком куб со сторонами 10 см. Если экструдер печатает пластиком при температуре 230 °С, а пластик этот выкладывается на холодный стол, то пластик выходя из сопла остынет довольно быстро. К тому же у большинства 3D-принтеров есть специальные охлаждающие вентиляторы, которые специально предназначены для принудительного обдува модели во время печати. Если модель из ABS пластика остывает при комнатной температуре в 30 °С, то ребро длиной в 10 см сожмется почти на 1,5 мм, в то время как это стол будет находиться при постоянной температуре. В силу этих разностей температур пластик по мере остывания будет стремиться оторваться от стола. Таким образом, для удачной печати параметр температуры стола при 3D-печати - важный фактор, который обязательно следует учитывать. Если вы замечаете, что сначала слой как будто прилипает к столу, но мере печати следующих слоев модель подрывается, то, возможно, причина именно в настройках температуры и охлаждения. Практически все 3D-принтеры, которые предназначены для печати высокотемпературными пластиками (например, ABS), имеют функцию подогрева стола, которая помогает при печати. Если стол нагрет до 110 °С и эта температура поддерживается в течение всего процесса печати, то это обеспечит сохранение температуры первого слоя, и он не будет сжиматься. Если у 3D принтера стол с подогревом, его можно включить, чтобы первый слой не остывал. В целом надо иметь в виду, что PLA пластик хорошо прилипает в том случае, если стол подогрет до 60-70 °С, а ABS лучше прилипнет при температуре 100-120 °С [8].

Процент заполнения. Внутреннее заполнение объекта играет роль фундамента для вышележащих слоев. Сплошные слои наверху распечатки требуют, чтобы

фундамент под ними был достаточно прочным. Если процент заполнения слишком мал, значит внутри будет слишком много пустого пространства (рисунок 9). Так, если заполнение установлено в 10%, остальные 90% будут пустотой, т.е. могут быть очень большие незаполненные пространства, поверх которых может печататься сплошной слой. Если при увеличении количества сплошных слоев неровности, дыры или щели все еще наблюдаются, может понадобиться увеличение процента заполнения. Например, если процент заполнения был 30%, его следует увеличить до 50%, в результате чего опора под сплошными верхними слоями станет более надежной [16].

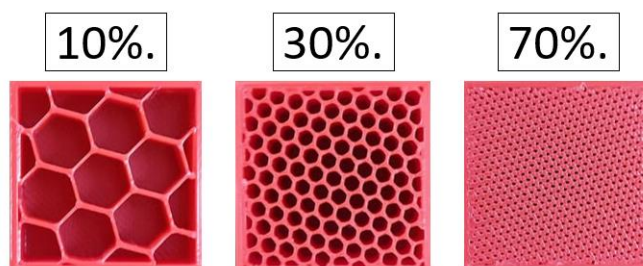


Рисунок 9 – Примеры деталей с разным процентом заполнения

Ретракция. Включение ретракции — это наиболее распространенный метод борьбы с образованием нитей при 3D-печати (рисунок 10а). Включение ретракции означает, что при пересечении печатающей головкой открытого пространства филамент будет немного подтягиваться назад подающим механизмом. Это предотвращает вытекание расплавленного пластика во время перемещения, так как действие "подтягивания" служит мерой против просачивания. Когда печатающая головка достигает следующей точки, филамент выталкивается обратно, и печать из сопла возобновляется (рисунок 10б).

В большинстве ПО ретракция обычно включена по умолчанию. Однако всегда полезно убедиться, что это так, особенно когда наблюдается образование нитей. Если настройка ретракции включена, но на изделиях всё равно появляются нити, возможно, потребуется более подробно настроить параметры ретракции.

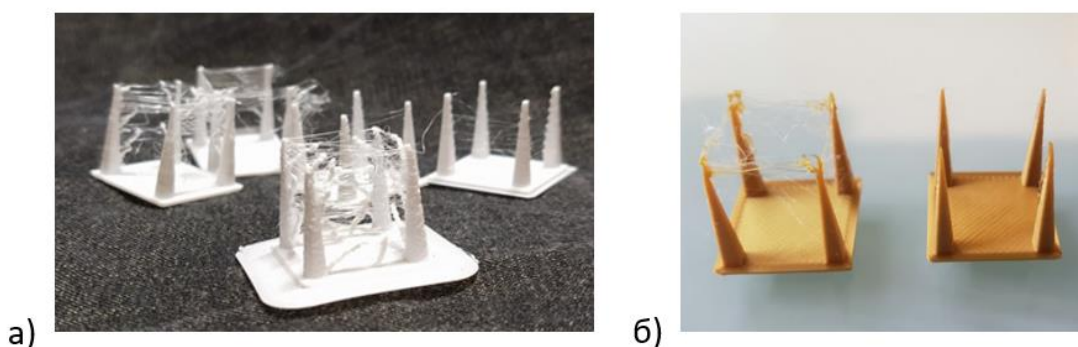


Рисунок 10 – Фотография изделий:

а) без ретракции; б) различия в печати с включенной ретракцией и без неё

Дефекты печати. При печати могут появляться различные дефекты. Большинство дефектов можно исправить за счёт корректирования перечисленных

параметров и прочих параметров. Некоторые появляются в результате нарушения условий среды при печати (например, изменение температуры помещения при отсутствии закрытой камеры), а некоторые могут указывать на неисправность комплектующих 3D-принтера (засор экструдера, износ элементов линейного перемещения). Примеры некоторых дефектов представлены на рисунке 8.

1.5. Основные проблемы при печати по технологии FDM. Способы их решения

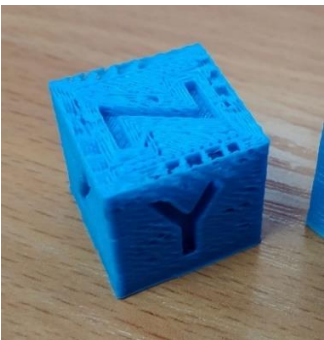
В FDM-печати могут возникнуть проблемы разного рода. Проблемы можно условно разделить на две части: трудности с началом печати и дефекты, получаемые в процессе, которые, в свою очередь, можно разделить на параметрические и механические. Например, печать может начаться, но материала в рабочей зоне не будет. Причин может быть несколько:

- нет подачи пластика или пластик застрял в печатной головке;
- низкая температура сопла;
- слишком низкий уровень первого слоя;
- пластик не липнет к столу (из-за высокого уровня первого слоя, низкой температуры печатного стола, плохой адгезии к поверхности или влажного пластика).

Для устранения этой проблемы необходимо в первую очередь проверить экструдер и филамент на предмет засора, зажима материала, либо на слишком большие зазоры между соплом и термобарьером. Если после прочистки и регулировки узлов, а также обезжиривания поверхности стола проблема не решилась, необходимо отрегулировать соответствующие параметры печати и повторить процедуру.

Наиболее частые причины плохого качества печати на новых и заведомо исправных принтерах в неправильных или неоптимальных настройках параметров при подготовке модели в «слайсере». Наиболее влиятельные параметры: температура сопла и стола, скорость печати, ширина линий, настройки принтера.

Таблица 2 – Основные проблемы при печати и способы их решения

Вид проблемы	Причины	Способы решения
 <p data-bbox="268 1982 507 2016">Недоэкструзия</p>	<p data-bbox="651 1641 1011 1720">Завышенный диаметр прутка.</p> <p data-bbox="651 1727 1011 1805">Завышенный диаметр сопла.</p> <p data-bbox="651 1812 1011 1890">Слабо прижато подающее колесо.</p> <p data-bbox="651 1897 1011 1975">Завышена скорость печати.</p>	<p data-bbox="1040 1704 1444 1912">Проверить филамент, сопло, при необходимости изменить соответствующие параметры.</p>

Вид проблемы	Причины	Способы решения
 <p data-bbox="268 555 507 591">Перезкструзия</p>	<p data-bbox="646 235 1013 571">Заниженный диаметр прутка. Заниженный диаметр сопла. Завышена температура сопла. Занижена скорость печати.</p>	<p data-bbox="1037 302 1452 515">Проверить филамент, сопло, при необходимости изменить соответствующие параметры.</p>
 <p data-bbox="255 936 515 969">Пропуски слоёв</p>	<p data-bbox="646 638 1013 929">Занижена температура сопла. Пластик застревает на подаче. Износ подающего механизма. Засорено сопло.</p>	<p data-bbox="1037 728 1452 840">Проверить механизм подачи и сопло, поправить и прочистить.</p>
 <p data-bbox="311 1261 459 1296">Перегрев</p>	<p data-bbox="646 1030 1013 1243">Нарушен баланс температур. Неправильно настроена изменяемая площадь нарезки.</p>	<p data-bbox="1037 1019 1452 1265">Снизить температуру, скорость печати, увеличить обдув Установить минимальное время печати слоёв (например, 10 с.)</p>
 <p data-bbox="335 1635 438 1675">Щели</p>	<p data-bbox="646 1444 1013 1523">Высокая скорость печати.</p>	<p data-bbox="1037 1344 1452 1635">Увеличить «нахлест», немного поднять температуру, включить параметр «заполнять промежутки между стенками» Снизить скорость печати</p>
 <p data-bbox="295 2027 478 2063">Расслоение</p>	<p data-bbox="646 1825 1013 1915">Материал с высокой термической усадкой.</p>	<p data-bbox="1037 1814 1452 1937">Проверить температуру сопла, снизить обдув, сменить материал</p>

Вид проблемы	Причины	Способы решения
Заскоки, вертикальные и горизонтальные волны, сдвиги слоёв	Износ или люфт механических элементов, сложная конфигурация детали.	Проверить и укрепить механическую часть принтера, проверить люфты и закусывания Уменьшить скорость Изменить конфигурацию модели

У одних и тех же проблем могут быть довольно очевидные причины, но в ряде случаев для решения проблемы может потребоваться комплексная проверка устройств печати или параметров печати.

1.6. Материалы изделий и постобработка изделий

Для технологии FDM доступны различные материалы, в числе которых обычные термополимеры (PLA и ABS), конструкционные материалы (PA, TPU и PETG) и термополимеры с высокими эксплуатационными характеристиками (PEEK и PEI). Обычные термополимеры хорошо поддаются дополнительной обработке, обладают отличными визуальными качествами, но чувствительны к условиям среды (ABS – к ультрафиолетовому излучению, PLA – к влаге). Конструкционные материалы прочные и износостойкие, но сложнее в изготовлении и обработке. Такие термополимеры, как PEEK и PEI обладают высокими эксплуатационными характеристиками, но имеют высокую стоимость. Широкий ассортимент доступных материалов позволяет делать выбор в зависимости от задачи и условий эксплуатации готовой детали.

Таблица 3 – Характеристики филаментов

Тип филамента	Температура сопла, °C	Температура платформы, °C	Скорость печати, мм/с
PLA	180-230	20-60	40-100
ABS	220-260	90-120	40-80
PETG	220-245	80-100	60-90
HIPS	230-240	90-120	40-80
Нейлон	230-260	100-120	30-40
PP	210-250	100-120	40-100
PEEK	360-410	120-180	20-40

Для достижения лучших свойств готовых изделий напечатанные детали можно подвергать постобработке. Выбор технологии постобработки зависит от свойств конкретного филамента. Большинство материалов хорошо обрабатывается резанием и шлифованием, такая обработка применяется для удаления лишнего материала на краях кромок и поддержках, а также сглаживания поверхностей. Для некоторых

пластиков можно использовать термическую обработку с помощью тепловых пушек и камер. В зависимости от химических свойств, можно использовать специальные химические методы обработки. Например, ABS отлично сглаживается парами ацетона, создавая детали с гладкой глянцевой поверхностью (рисунок 11). Аналогичным образом детали из ABS можно соединять между собой с помощью растворителей, например, ацетона, а также клея или цемента на основе ABS. В некоторых случаях применяется нанесение гальванического покрытия на пластиковые изделия, что позволяет получить дополнительные свойства (магнетизм или электропроводность, а также улучшенный внешний вид). Для реализации используется контролируемый электролиз.



Рисунок 11 – Постобработка напечатанной детали

Помимо распространённых полимерных материалов, развиваются технологии печати углеродным волокном и керамикой. Чаще всего из-за своих свойств эти материалы используются не в чистом виде, а в комбинации с иными термопластичными материалами.

Углеродное волокно, или углеволокно, обладает высокой прочностью при своей лёгкости, а также отличной термостойкостью и стабильностью размеров – углеволокно практически не даёт усадки после остывания. Однако, помимо высокой стоимости, из-за своей высокой прочности углеродная нить способна засорять и даже деформировать сопла, вследствие чего рекомендуется применять сопла из закалённой стали большего диаметра – от 0,5 мм и выше. Также углеволокно увеличивает хрупкость филамента, из-за чего лучше отказаться от применения данного материала для печати деталей, которые подвержены воздействию больших и ударных нагрузок.

В аддитивном производстве углеродное волокно часто применяют в виде филаментов, которые состоят из коротких волокон, которые образованы мельчайшими сегментами (до миллиметра в длину) в смеси с термопластом. В настоящее время существуют филаменты с углеволокном в составе на основе PLA, PETG, ABS, нейлона и поликарбоната, в названии таких материалов добавляется приставка Carbon Fiber. Именно из-за добавления углеродных волокон в филамент для печати используется сопло большого диаметра. Помимо совмещённых филаментов, в аддитивном производстве распространена технология непрерывного армирования карбоновым волокном, где задействуются два сопла: для нити и углеволокна.

Для печати керамикой применяют различные материалы: терракота, фарфор, фаянс и керамогранит. Отличительное свойство этих материалов является затвердевание при высоких температурах (при обжиге). Для печати керамикой может применяться экструзия керамического материала напрямую, а также специального филамента, представляющего из себя композит из связующего на основе полимера и керамического материала. При втором способе полимер сгорает в процессе обжига, оставляя после себя только керамический материал. Из-за особенностей материала для аддитивного производства с применением керамики используются специализированные 3D-принтеры, при этом постобработке уделяется особое внимание.

В случае экструзии керамики, отпечаткам дают время для полного высыхания, после чего обжигают в печах. Затем на отпечатки наносится глазурь, после чего изделия обжигаются в глазури. Чаще всего обжиг проводится с помощью тех же печей и технологий, что и для традиционной керамики и гончарного дела. Для керамических филаментов, напечатанных на обычных FDM-принтерах, процесс последующей обработки несколько сложнее. Перед обжигом отпечатка для некоторых филаментов требуется процесс дебридинга (избавления детали от примесей). Например, циркониевый филамент требует двухэтапного процесса после печати детали. Сначала деталь помещается в химическую ванну с ацетоном для растворения связующего, а затем обжигается в тигле с порошковым наполнителем для термического удаления остатков связующего. Готовые изделия отличаются высокими прочностными характеристиками, а также высокими рабочими температурами, химической и радиационной стойкостью и биосовместимостью.

1.7. Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на создание CAD-модели.
2. Выполнить импортирование CAD-модели в формате STL. Настроить параметры принтера в программном обеспечении для слайсинга.
3. Проанализировать доступные параметры печати. Выбрать плоскость расположение модели на рабочем столе при печати печати. Осуществить генерирование управляющей программы и проверить её. При необходимости внести корректировки в параметры печати.
4. Выполнить запуск печати изделия на 3D принтере.
5. Выполнить анализ влияния настраиваемых параметров печати при подготовке файла для печати.
6. Оформить отчёт о проделанной работе.

1.8. Содержание отчета

Отчёт о лабораторной работе выполняется в формате PDF или DOCX. Он должен содержать:

- титульный лист с указанием названия лабораторной работы, ФИО студента, выполнившего работу, ФИО и должности преподавателя;

- цель работы и задание на лабораторную работу;
- теоретическую часть с краткими сведениями о технологии FDM;
- ход работы с пояснениями и снимками экрана из САПР и слайсера;
- вывод о проделанной работе.

1.9. Контрольные вопросы

- 1) Каким образом выполняется подбор температурных режимов для печати ABS пластиком. Каким образом выполняется подбор температурных режимов для печати PLA пластиком?
- 2) Какие имеются ограничения при настройке значений параметров печати при подготовке файла для печати по технологии FDM?
- 3) Какие существуют способы увеличения скорости печати?
- 4) Объяснить конструкцию печатной головы для 3D принтера по технологии печати FDM.

2. Исследование предела прочности образцов, изготовленных с помощью аддитивных технологий (FDM) из различных типов материалов

Цель работы: Исследование механических свойств образцов, изготовленных с помощью аддитивных технологий (FDM).

2.1. Испытания изделий на прочность

Испытания изделий на прочность — это важный этап в процессе разработки и производства, который позволяет оценить, насколько изделия способны выдерживать различные нагрузки и условия эксплуатации. Эти испытания помогают выявить слабые места, предотвратить возможные поломки и повысить надежность продукции. Прочность — свойство материала сопротивляться разрушению под действием напряжений, возникающих под воздействием внешних сил.

Испытания на прочность бывают нескольких типов:

- статические испытания,
- динамические испытания,
- ударные испытания,
- термические испытания.

При проведении статических испытаний изделия подвергаются нагрузке, которая постепенно увеличивается вплоть до разрушения изделия. Чаще всего для этих целей используют прессы и разрывные машины с применением специальной оснастки. С помощью статических испытаний определяются такие показатели, как предел прочности и предел текучести.

Динамические испытания подразумевают циклическое нагружение изделия, что позволяет оценить его усталостные свойства. Для таких испытаний применяются вибростенды, ударные стенды и их комбинированные аналоги.

Ударные испытания похожи на динамические испытания, но отличаются более резким воздействием на изделие. Чаще всего с помощью ударных испытаний получают такие показатели, как ударная вязкость и способность изделия противостоять внезапным нагрузкам.

Термические испытания используются для оценки перечисленных выше характеристик, но в различных температурных режимах. Эти испытания важны для материалов и изделий, которые будут применяться в жёстких условиях эксплуатации. Для проведения используют печи, камеры холода и прочие системы температурных испытаний.

Испытания материалов и изделий регламентируются соответствующими стандартами. Также регламентированы и типоразмеры образцов, предназначенных для отдельных виды испытаний, например, на скручивание или разрыв.

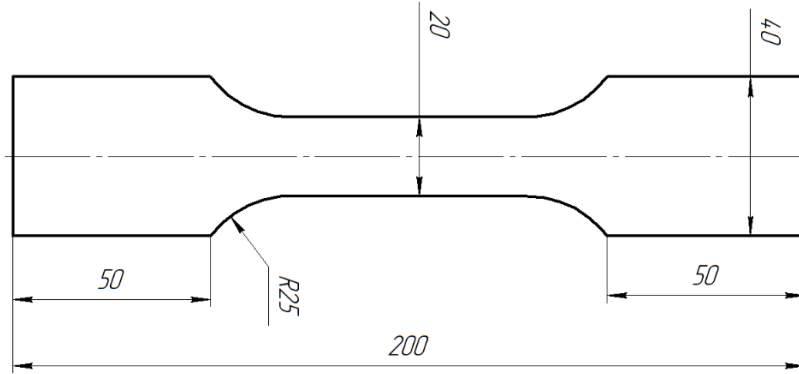


Рисунок 12 – Эскиз пропорционального плоского образца

2.2. Прочностные характеристики материалов аддитивного производства

Одной из характеристик прочности является предел прочности. В данной работе будет рассмотрен его частный случай – предел прочности при одноосном растяжении σ_B , вычисляемый по формуле:

$$\sigma_B = \frac{F_p}{S} \left(1 \text{ МПа} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ мм}^2} \right), \quad (1)$$

где F – сила, приложенная к растяжению тела в момент его статического разрушения; S – площадь поперечного сечения рабочей части образца.

Упругостью называют свойство твёрдых материалов возвращаться в изначальную форму при упругой деформации. Данное свойство характеризуется модулем упругости (модулем Юнга) E :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

где σ – максимальное значение напряжения во время упругой деформации образца; ε – упругая деформация образца.

Упругая деформация (удлинение объекта испытаний под воздействием внешних сил) исчезает после прекращения действий на тело внешних сил (тело возвращается к своим исходным размерам). Как правило, участок кривой нагружения (рисунок 19) при упругих деформациях является прямолинейным, что позволяет определить нагрузку, при которой началась пластическая («невозвратная») деформация, и величину удлинения образца.

Упругая деформация – величина относительная, и рассчитывается (при одноосном растяжении) с учетом изначальной длины l образца и длины образца, достигнутой при упругих деформациях l_y :

$$\varepsilon = \frac{l}{l_y} \quad (3)$$

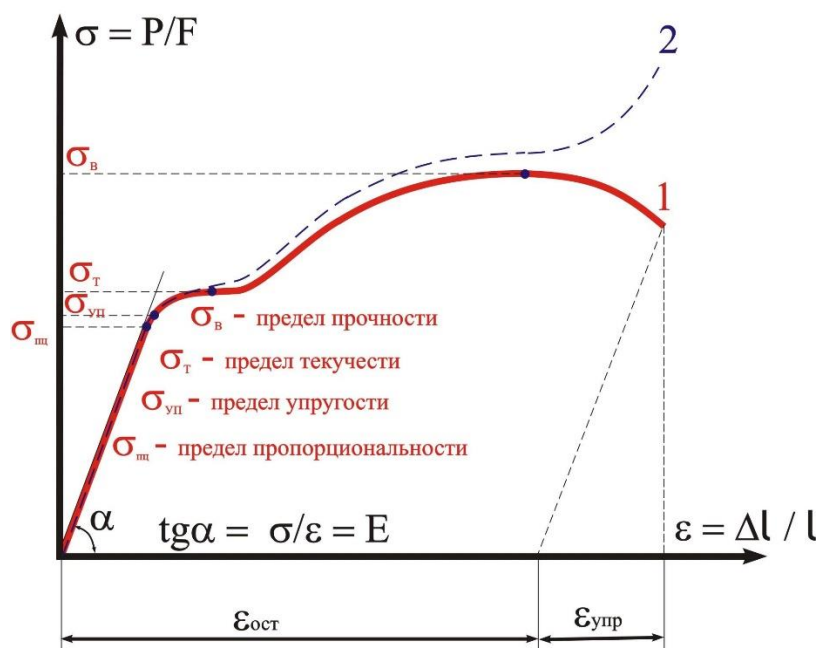


Рисунок 13 – Кривая нагружения при одноосном растяжении

2.3. Влияние направления слоев при печати по технологии FDM на качество

В зависимости от направления печати и заполнения изменяется качество печати, как следствие прочностные характеристики готовых изделий тоже могут измениться. Чем выше процент заполнения, тем выше прочность и меньше гибкость (рисунок 14).



Рисунок 14 – Образцы с различной плотностью заполнения

При выборе максимально прочного заполнения необходимо учитывать два момента — направление нагрузок и тип прочности.

Не все виды заполнения обеспечивают одинаковую прочность по всем трем осям — X, Y и Z. Некоторые из них оптимизированы под нагрузки в конкретной плоскости. Например, решетчатое заполнение (Grid) дает максимальное

сопротивление нагрузкам на сжатие в вертикальной плоскости, но слабее в горизонтальной. Это необходимо учитывать при пространственной ориентации цифровых 3D-модели на виртуальном столике в слайсере: модель можно развернуть так, чтобы заполнение давало максимальную прочность в требуемом направлении.

Некоторые виды заполнений наоборот дают сбалансированную прочность по всем осям, но нередко максимальные показатели прочности в любом конкретном направлении при этом оказываются несколько ниже [17].

Печатные детали обладают свойствами анизотропности, то есть разницы в прочности в зависимости от направления укладки нитей: если растягивать изделие вдоль слоев, прочность будет выше, чем если растягивать поперек, то есть пытаться оторвать слои друг от друга.

Прочность на сжатие определяется с помощью образцов в виде кубиков или цилиндров, сжимаемых специальным прессом. Здесь тоже играет роль анизотропность, так как при сжатии изделия начинают утолщаться в середине, то есть одновременно испытывать нагрузки на сжатие по вертикали и на разрыв по горизонтали. Таким образом, условно монолитные 3D-печатные изделия будут показывать максимальную прочность при сжатии с горизонтальной ориентацией слоев, а при испытаниях частично заполненных моделей показатели во многом будут зависеть не только от ориентации слоев, но и от формы и ориентации заполнения. Таким образом, нагрузка должна распределяться поперек слоев печати, а не вдоль, иначе слои могут разойтись (рисунок 15).

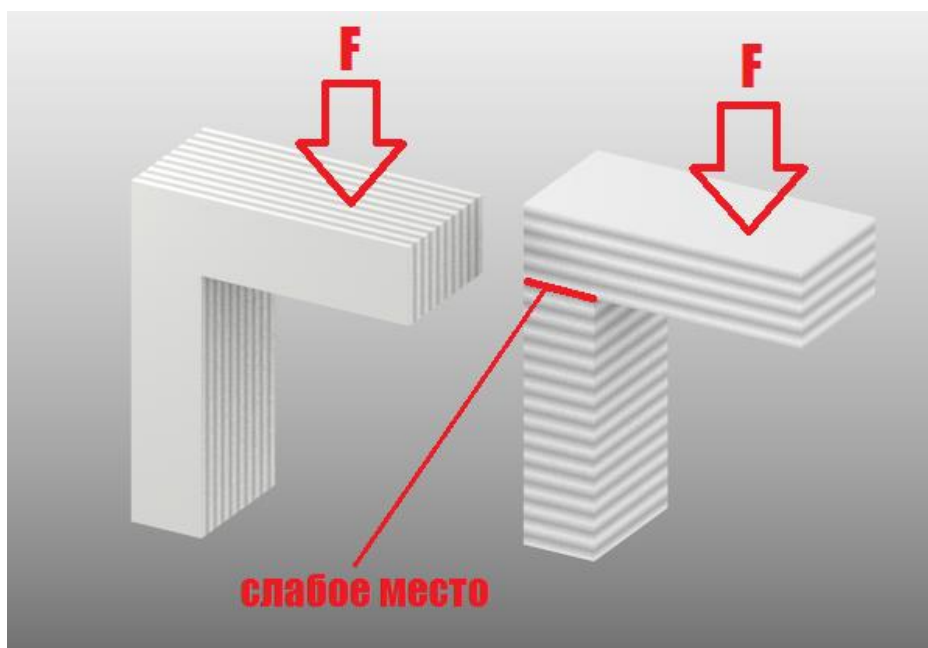
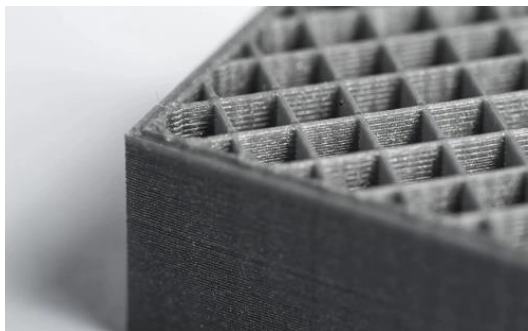

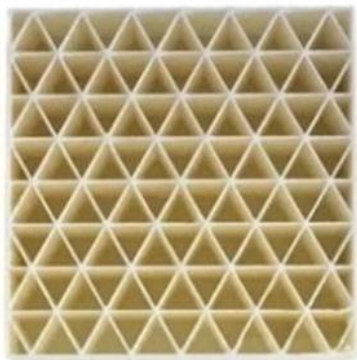




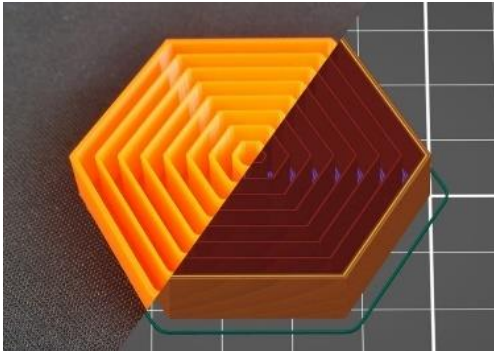
Рисунок 15 – Варианты нанесения слоёв



2.4. Влияние параметров заполнения на прочностные характеристики

Как уже было упомянуто ранее, при выборе максимально прочного заполнения необходимо учитывать дополнительно и тип прочности. Показатели прочности бывают разными, например на растяжение, на сжатие, на изгиб или кручение. В зависимости от шаблона заполнения, напечатанная деталь будет иметь различные прочностные характеристики.

Таблица 4 – Сравнение прочностных характеристик различных шаблонов заполнения

Шаблон	Прочность на растяжение	Прочность на сжатие
 Решётчатое заполнение	низкая	низкая
 Зигзаг	низкая	низкая
 Треугольное заполнение	средняя	средняя

Шаблон	Прочность на растяжение	Прочность на сжатие
 <p data-bbox="277 804 633 840">Линейное заполнение</p>	<p data-bbox="884 539 1013 575">средняя</p>	<p data-bbox="1246 539 1375 575">средняя</p>
 <p data-bbox="261 1373 649 1408">Гибридное заполнение</p>	<p data-bbox="884 1117 1013 1153">средняя</p>	<p data-bbox="1246 1117 1375 1153">средняя</p>
 <p data-bbox="217 1854 694 1890">Концентрическое заполнение</p>	<p data-bbox="884 1644 1013 1680">высокая</p>	<p data-bbox="1246 1644 1375 1680">высокая</p>

Шаблон	Прочность на растяжение	Прочность на сжатие
 <p data-bbox="264 734 644 768">Кубическое заполнение</p>	<p data-bbox="884 506 1013 539">высокая</p>	<p data-bbox="1246 506 1375 539">высокая</p>
 <p data-bbox="293 1317 616 1350">Сотовое заполнение</p>	<p data-bbox="884 1055 1013 1088">высокая</p>	<p data-bbox="1246 1055 1375 1088">высокая</p>

Важно отметить, что прочностные характеристики могут изменяться в определённых направлениях для конкретного шаблона заполнения. Также различные шаблоны заполнения требуют различное время на печать, что может стать ограничивающим фактором при выборе параметров печати.

2.5. Порядок выполнения работы

1. Провести разрушающие испытания для плоских и цилиндрических образцов, подготовленных преподавателем, с помощью разрывной машины на базе Университета.
2. Используя массив данных, сформированные в ходе испытаний, построить кривые нагружения $F(\text{кН})/\Delta l(\text{мм})$ каждого образца.
3. Рассчитать предел прочности и модуль упругости испытуемых образцов. Занести результаты в таблицу.
4. Выполнить сравнительную оценку

5. Оформить отчёт о проделанной работе.

2.6. Содержание отчета

Отчёт о лабораторной работе выполняется в формате PDF или DOCX. Он должен содержать:

- титульный лист с указанием названия лабораторной работы, ФИО студента, выполнившего работу, ФИО и должности преподавателя;
- цель работы и задание на лабораторную работу;
- теоретическую часть с краткими сведениями о прочностных характеристиках образцов, изготовленных по технологии FDM;
- ход работы с графиками нагружения и таблицей с расчётами предела прочности и модуля упругости исследуемых образцов;
- вывод о проделанной работе.

2.7. Контрольные вопросы

- 1) Каким образом выполняется расчет предела прочности и модуля упругости?
- 2) В соответствии с какими нормативными документами проводятся разрушающие испытания плоских и цилиндрических образцов?
- 3) Как ориентация слоев при печати образцов влияет на механические свойства полученного изделия?

3. Изучение возможностей программного обеспечения для 3D-печати по технологии SLA

Цель работы: Изучение основ работы с программным обеспечением для 3D-печати по технологии SLA.

3.1. Основы технологии SLA

Лазерная стереолитография (SLA) – метод 3D-печати, который для создания объектов использует фотополимерные смолы, отличительной особенностью которых является способность отвердевать под воздействием света. SLA является второй по популярности аддитивной технологией после FDM, но также является исторически одной из первых технологий 3D-печати. Для полимеризации жидкой фотополимерной смолы в качестве источника УФ-излучения чаще всего используется лазер, однако в настоящее время ведутся исследования с применением ультрафиолетовых светодиодных проекторов.

Во время печати фотополимерная смола размещается в специальном резервуаре с прозрачным доньшком. Для наведения луча лазера в пространстве резервуара применяется гальванометр, который состоит из двух зеркал и двух гальванометрических высокоточных двигателей. Данное приспособление позволяет управлять лазерным лучом с высокой точностью и большой скоростью в двухмерной плоскости. Также для направления луча лазера в резервуар используется дополнительное зеркало, расположенное под ним. Таким образом, отверждение смолы происходит послойно до полной готовности детали аналогично процессу печати по технологии FDM. В некоторых случаях в конструкции SLA-принтера может применяться механизм, который периодически качает резервуар из стороны в сторону после создания каждого слоя с целью перемешивания фотополимера, что облегчает отрыв детали от доньшка резервуара. Схема SLA-печати представлена на рисунке 16.

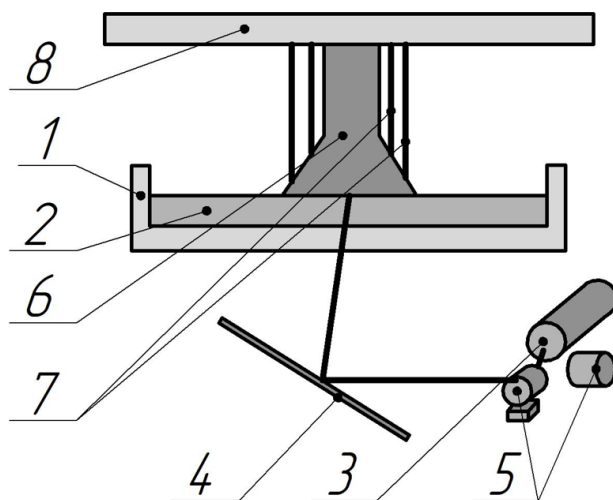


Рисунок 16 – Схема SLA-печати:

1 – резервуар; 2 – смола; 3 – лазер; 4 – сканирующее зеркало; 5 – гальванометр;
6 – деталь; 7 – поддержки; 8 - платформа.

Для технологии SLA используются различные виды фотополимерных смол, каждая из которых обладает особыми свойствами. Например, бывают стандартные смолы, которые обладают гладкой поверхностью, но могут крошиться. Существуют прозрачные смолы, долговечные смолы с более высокой плотностью, смолы с высокой температурной сопротивляемостью. Также существуют и активно применяются стоматологические смолы, которые являются биологически совместимыми и износостойкими, но гораздо дороже остальных видов, а также гибкие смолы, чья гибкость подобна резиновым материалам. Выбор материала обусловлен назначением изготавливаемой детали.

Технология SLA обладает рядом преимуществ:

- высокая точность построения и высокое качество поверхности,
- более быстрый процесс печати,
- легкая обрабатываемость напечатанной детали,
- высокая надёжность SLA-принтеров.

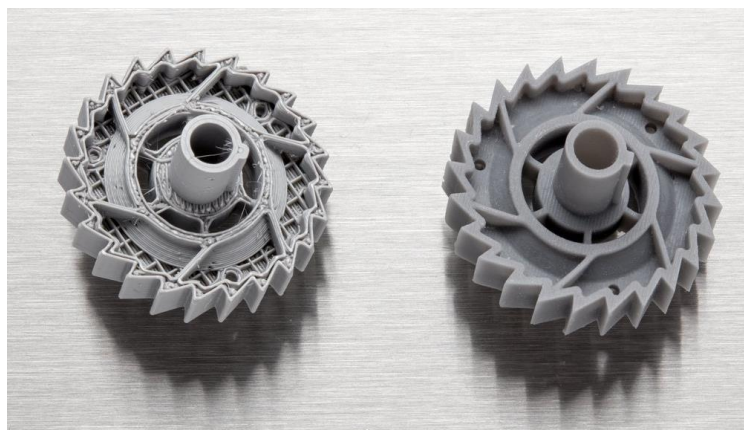


Рисунок 17 – Сравнение деталей, полученных с помощью технологий FDM и SLA

У технологии SLA есть ряд ограничений. Один из главных недостатков – высокая стоимость расходных материалов и обслуживания. Также для обеспечения качественного отверждения детали необходимо дополнительно промывать напечатанное изделие и подвергать дополнительной УФ-засветке.

Таким образом, технология SLA является более сложной и дорогой по сравнению с FDM, но она позволяет создавать детали с более высоким качеством и лучшими эксплуатационными характеристиками. Именно поэтому с помощью SLA-печати, как правило, получают преимущественно готовые к окончательному применению изделия, в отличие от FDM-печати, которая зарекомендовала себя в быстром прототипировании.

3.2. Инструменты для подготовки моделей деталей к изготовлению по технологии SLA

Для работы с SLA-печатью используются аналогичные слайсеры, как и для FDM-печати. Наиболее распространены универсальные слайсеры, которые

поддерживают несколько технологий печати, в том числе FDM, SLA и другие. Чаще всего слайсеры создаются разработчиками ПО или производителями оборудования для аддитивных технологий.

Алгоритм подготовки модели к печати по технологии SLA также состоит из двух этапов и аналогичен алгоритму для FDM-печати: подготовка CAD-модели; слайсинг и подготовка задания на печать.

Поскольку принцип работы технологий SLA и FDM отличается, отличается и перечень настраиваемых параметров печати. Такие параметры, как высота слоя и настройки скорости печати, имеют схожий принцип работы и оказывают схожее влияние на процесс печати. Для SLA-печати дополнительно можно настроить время засветки слоя, которое влияет на качество затвердевания слоя. Также есть возможность настроить сглаживание, что позволяет убрать эффект ступенчатости и уменьшить видимость слоёв.

Поддержки в SLA-печати отличаются и имеют цилиндрическую форму с наклонным концом и заострённым наконечником. Количество и форма поддержек также зависят от позиционирования.

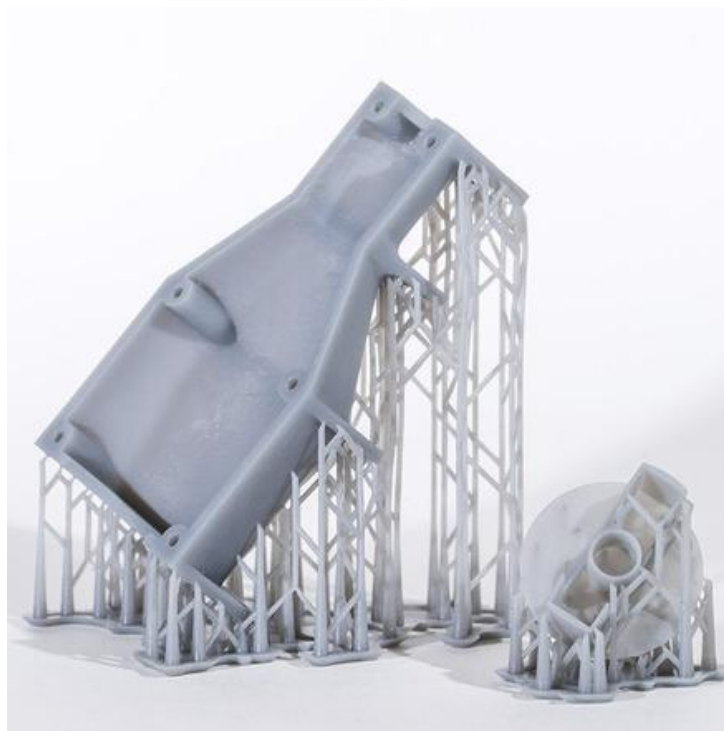


Рисунок 18 – Внешний вид поддержек в SLA-печати

Поскольку в SLA-печати детали выращиваются сверху вниз за счёт постепенного подъёма платформы из резервуара со смолой, позиционирование детали можно изменить, а именно вращать под разными углами по разным осям. Дополнительно вместе с позиционированием можно настроить форму и размеры плота – первого слоя, которой станет фундаментом для печати всей детали.

Также для настройки SLA-печати доступны параметры полостей. Данная настройка позволяет создать полости внутри модели, задав толщину стенок. Изменение этого параметра позволяет не только сэкономить расходную смолу, что

очень важно при печати больших серий деталей, но и уменьшить «эффект присоски», возникающий при отрыве готового слоя от прозрачного доньшка резервуара. Сила всасывания больше, когда площадь поверхности слоя больше, однако с помощью создания полостей эту площадь можно уменьшить [19].

После настройки параметров печати происходит генерация G-кода и отрисовка готовой модели с поддержками и полостями. На данном этапе можно оценить качество и скорость печати и передать программу в SLA-принтер, либо откорректировать параметры печати и позиционирование детали.

3.3. Особенности настройки параметров печати по технологии SLA

В связи с другим принципом формообразования и выращивания моделей, отличающегося от FDM-технологии, набор параметров для SLA-печати отличается. Существуют и аналогичные настройки, например настройка высоты слоя, регулировка параметров поддержек.



Рисунок 19 – Сравнение параметров толщины слоя

Один из отличительных параметров печати для технологии SLA – время засветки. Это время, которое требуется для затвердевания обычного, то есть не находящегося в основании слоя фотополимера и обычно составляет от 3 до 20 секунд.

В качестве отправной точки следует использовать величины, указываемые в инструкциях для смол и конкретных моделей принтеров, но надо быть готовым к тому, что понадобятся корректировки. Конкретное значение зависит от состава смолы и мощности светового потока данного экземпляра принтера [13].

Если время засветки слишком большое, то модель получается более широкой, так как из-за краевых эффектов полимер отвердевает и в соседних областях. Если время засветки слишком мало, то модель получается более узкой. Подбор времени засветки – это всегда поиск компромисса между требованиями к качеству выполнения щелей и тонких стенок [14].



Рисунок 20 – Сравнение образцов, напечатанных с превышенным (слева), заниженным (посередине) и оптимальным (справа) временем засветки

Отдельно можно настроить время засветки низа. Это время засветки первых нескольких слоев основания. Время засветки низа превышает время засветки остальных слоев в 5–10 раз, а иногда и более, так как необходимо, чтобы модель хорошо прилипла к платформе. Если модель отлипает от платформы, значит нужно существенно (на 10–50%) увеличить этот параметр. Чрезмерное увеличение этого параметра приведёт к большим затратам времени. Кроме того, при слишком большом времени засветки нижние слои окажутся намного шире, чем задано. Во избежание этого, в большинстве случаев модели печатаются целиком на подложках.

Параметр скорости подъема обычных слоев и скорость подъема нижних слоев можно регулировать, чтобы сократить общее время печати. Хорошая скорость подъема должна находиться в диапазоне 60–150 мм/мин. Для больших моделей или больших объемов печати следует избегать слишком быстрой печати; дополнительный вес печати или печатной пластины способствует более медленному перемещению для успешной печати.

Скорость подъема первых слоев не следует увеличивать слишком сильно, так как есть риск создания нестабильных нижних слоёв, что может привести к проблемам с печатью.

Высота подъема – это то, на какую высоту поднимается стол принтера после засветки каждого слоя. Данная функция напрямую связана со скоростью подъема и не менее важна для минимизации повреждений слабых участков модели во время ее подъема.

Расстояние подъема должно быть достаточно большим, чтобы позволить необходимому количеству жидкой смолы затечь в образовавшийся зазор, но не настолько большим, чтобы это неоправданно увеличивало время печати. В среднем, расстояние подъема обычно колеблется в пределах 5 мм.

Регулировка параметров подъема помогает добиться качественной печати, но еще один отличный способ – это создание полостей в моделях. Когда отвержденная слой отделяется от FEP-пленки, создается «эффект присоски», который можно уменьшить за счёт создания полостей, чтобы уменьшить риск повреждения модели.

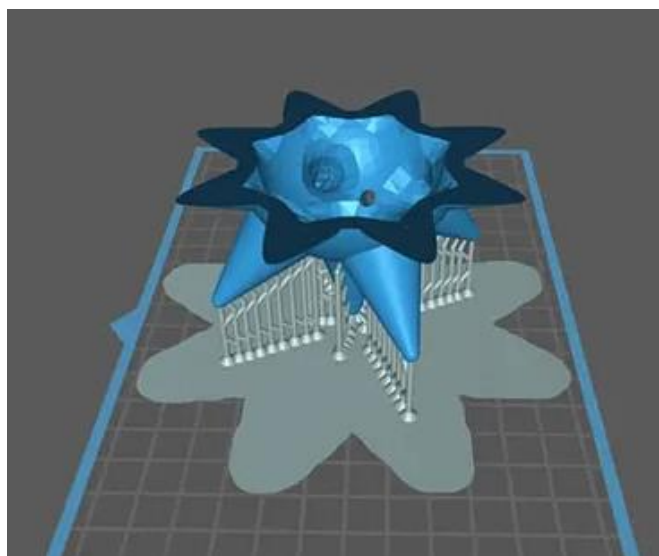


Рисунок 21 – Создание полостей в SLA-печати

Толщина стенки 1,2–2 мм должна обеспечивать хороший баланс между прочностью, качеством печати и расходом смолы, особенно для небольших моделей. Большие модели из смолы могут быть слишком хрупкими для таких тонких стенок. Также рекомендуется создавать по крайней мере одно отверстие на каждую полость. Это позволяет смоле и воздуху вытекать из модели во время печати. Полая модель без дренажного отверстия только усиливает прилипание модели к FEP-пленке во время печати.

Дополнительно есть возможность более точно настроить параметры сглаживания модели с целью улучшения качества поверхности. Не стоит забывать и про позиционирование модели. Деталь должна быть позиционирована таким образом, чтобы она требовала меньшего количества поддержек, не имела больших поперечных сечений и занимала меньше времени на печать.

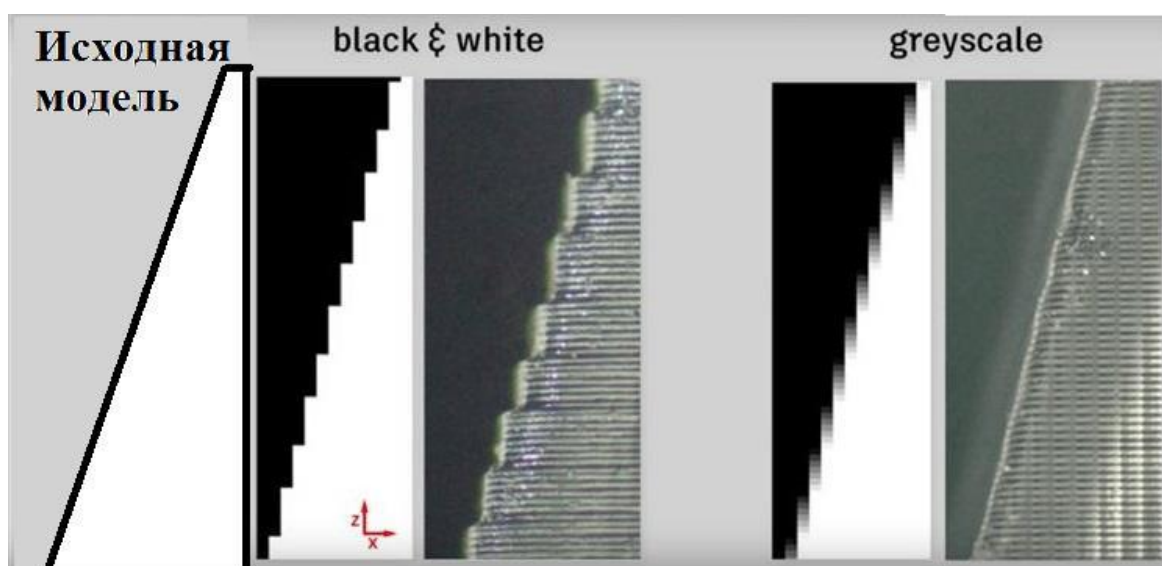


Рисунок 22 – Регулирование сглаживания в SLA-печати

3.4. Постобработка изделий, изготовленных методом SLA печати

Детали, полученные с помощью технологии SLA, тоже могут подвергаться постобработке. Постобработка напечатанных на SLA-3D-принтерах деталей и предметов имеет несколько целей и реализуется несколькими разными методами.

Среди целей постобработки:

- повышение качества поверхности;
- удаление следов производства;
- придание гладкости;
- повышение механических качеств изделия, таких как прочность и устойчивость к различным воздействиям, химическим, механическим, погодным.

Как и изделия из термополимеров, изготовленные из фотополимеров детали также хорошо подвергаются механической обработке. Чаще всего это операции удаления поддержек с последующей шлифовкой и даже полировкой.



Рисунок 23 – Промывка деталей перед механической обработкой

Характерная особенность постобработки деталей, полученных с помощью SLA, является дозасветка. Дозасветка – это следующий этап постобработки, на котором модель приобретает прочность и другие необходимые характеристики. При этом, чем прочнее нужно получить фотополимер, тем более длительное отверждение потребуется.

Возможно применение химической полировки, которая производится, как правило, растворителями путем нанесения их на изделие кистью, погружением в сосуд с растворителем или парами. Последний способ обработки с помощью испарений растворителя самый точный, качественный и аккуратный, и именно для него существуют полировальные камеры, которые производят обработку изделий парами растворителя в закрытом объеме.

Напечатанная модель в таких аппаратах помещается на платформу камеры, представляющую собой обычно статичную подставку или вращающийся предметный столик, после чего камера герметично закрывается и в нее подаются пары растворителя, которые взаимодействуют с материалом модели, растворяя неровности на ее поверхности, что делает поверхность ровной и блестящей, глянцевой.

Также на изделия могут наноситься покрытия. Если есть необходимость в выравнивании поверхности для последующей покраски, на 3D-печатные изделия может наноситься шпаклевка, выполняющая заодно и роль грунта для лучшей адгезии с краской. Если необходимости в выравнивании нет, то прямо на пластик может быть нанесен тонкий слой грунтовки и затем краски. Краски и покрытия могут быть разных химических составов, в том числе эпоксидные покрытия, металлосодержащие лаки, светонакопительные, и многие другие.

В некоторых случаях производится металлизация изделий — то есть нанесение тонкого слоя металла, которое происходит обычно гальваническим способом за счёт контролируемого электролиза.

3.5. Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на создание САД-модели.
2. Настроить параметры принтера в слайсере и загрузить САД-модель.
3. Проанализировать доступные параметры печати. Выбрать расположение модели на платформе и настроить параметры печати. Сгенерировать управляющую программу и проверить её. При необходимости внести корректировки в параметры печати.
4. Выполнить запуск печати изделия на 3D принтере.
5. Оформить отчёт о проделанной работе.

3.6. Содержание отчета

Отчёт о лабораторной работе выполняется в формате PDF или DOCX. Он должен содержать:

- титульный лист с указанием названия лабораторной работы, ФИО студента, выполнившего работу, ФИО и должности преподавателя;
- цель работы и задание на лабораторную работу;
- теоретическую часть с краткими сведениями о технологии FDM;
- ход работы с пояснениями и снимками экрана из САПР и слайсера;
- вывод о проделанной работе.

3.7. Контрольные вопросы

- 1) Как работает принтер для SLA печати?
- 2) Какие материалы применяются для SLA печати?
- 3) Каким образом выполняют постобработку деталей после SLA печати?
- 4) Какие особенности имеются у SLA печати?

Список литературы

1. Ляпков, А. А. Полимерные аддитивные технологии: учебное пособие для вузов / А. А. Ляпков, А. А. Троян. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2024. — 120 с. — ISBN 978-5-507-47656-5. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/402005> (дата обращения: 17.11.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Солнцев, Ю. П. Специальные материалы в машиностроении: учебник для вузов / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин, В. Ю. Пирирайнен. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2024. — 664 с. — ISBN 978-5-507-47646-6. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/399746> (дата обращения: 20.11.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Канищев, М. В. Введение в аддитивные технологии. Т. 1. Обзор основных технологий 3D-печати: учебник / М.В. Канищев, Л.М. Ульев. — Москва: Издательский Дом НИТУ «МИСиС», 2023. — 352 с.
4. Проектирование технологического оборудования для трехмерных технологий : методические указания по выполнению курсового проекта / сост. Ю. Е. Махаринский, Р. В. Окунев, А.В. Котович. — Витебск : УО «ВГТУ», 2022. — 31 с.
5. Проектное моделирование и прототипирование: методические указания по выполнению практических работ для студентов направления подготовки 18.03.01 «Химическая технология» / — Невинномыск: Невинномыский технологический институт (филиал) СКФУ, 2024. — 557 с.
6. Аддитивные технологии: методические рекомендации к лабораторным работам для студентов специальности 1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов» / В.Н. Шеменков, М.Н. Миронова, С.Г. Полторацкий, Е.Ю. Демиденко — Могилев. Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2022. — 48 с.
7. Виды кинематики в FDM 3D принтерах // 3DToday : сайт. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/lider-3d/vidy-kinematiki-v-fdm-3d-printerax> (дата обращения: 27.11.2024).
8. BIQU-Hurakan. Руководство пользователя v 1.0 // 3DROB : сайт. URL: https://3drob.ru/image/catalog/printers/3d_printers/btt/hurakan/hurakan_user_manual_ru.pdf (дата обращения: 27.11.2024).
9. Из чего состоит и как работает 3D-принтер? // Vektorus : сайт. URL: <https://vektorus.ru/blog/iz-chego-sostoit-3d-printer.html> (дата обращения: 27.11.2024).
10. Ключевые особенности FDM-принтеров: на что обратить внимание при выборе // Globatek 3D : сайт. URL: <https://globatek.ru/3d-wiki/fdm/kak-vybrat-fdm-print> (дата обращения: 27.11.2024).
11. Нагреватель экструдера 3d принтера // Мастер на все руки «PROMO» : сайт. URL: <https://englishpromo.ru/2019/12/nagrevatel-jekstrudera-3d-printera/> (дата обращения: 27.11.2024).

12. Настройки качества печати. Проблемы и решения // 3DROB : сайт. URL: https://3drob.ru/stati/pro_3d_pechat/nastroyki_kachestva_pechati_problemy_i_resheniya (дата обращения: 27.11.2024).
13. Настройка параметров 3D-печати фотополимерами // Top3DShop : сайт. URL: <https://top3dshop.ru/blog/settings-for-3d-printing-with-photopolymer-resins.html> (дата обращения: 27.11.2024).
14. Оптимальные настройки фотополимерного 3D-принтера для получения идеальных результатов печати // 3DLosPrinters : сайт. URL: <https://losprinters.ru/articles/optimalnye-nastroyki-fotopolimernogo-3d-printera-dlya-polucheniya-idealnykh-rezultatov-pechati/> (дата обращения: 27.11.2024).
15. Печатающая головка для 3d принтера. Пластика экструдирована недостаточно. Важные характеристики экструдеров филамента // Redcomrade: сайт. URL: <https://redcomrade.ru/monitors/pechatayushchaya-golovka-dlya-3d-printera-plastika-ekstrudiruetsya-nedostatochno/> (дата обращения: 27.11.2024).
16. Проблемы качества 3D-печати // Техно 3D: сайт. URL: <https://3dpt.ru/page/faq> (дата обращения: 27.11.2024).
17. Прочность разных видов заполнений в 3D-печати // REC : сайт. URL: <https://rec3d.ru/rec-wiki/prochnost-raznykh-vidov-zapolneniy/> (дата обращения: 27.11.2024).
18. Разновидности кинематик FDM 3D-принтеров // 3DiY shop : сайт. URL: <https://3d-diy.ru/blog/raznovidnosti-kinematik-fdm-3d-printerov/> (дата обращения: 27.11.2024).
19. Фотополимерная печать: 10 настроек слайсера для достижения наилучших результатов - полезные материалы от интернет-магазина «Цветной Мир» // Цветной мир : сайт. URL: <https://cvetmir3d.ru/blog/poleznoe/fotopolimernaya-pechat-10-nastroyek-slaysera-dlya-dostizheniya-nailuchshikh-rezultatov/> (дата обращения: 27.11.2024).
20. Что лучше: экструдер «директ» или «боуден»? // Цветной мир : сайт. URL: <https://cvetmir3d.ru/blog/poleznoe/chto-luchshe-ekstruder-direkt-ili-bouden/> (дата обращения: 27.11.2024).
21. Экструдер для 3D принтера своими руками // Цвет-Чер-Мет : сайт. URL: <https://melt-spb.ru/oborudovanie/princip-raboty-ekstrudera.html> (дата обращения: 27.11.2024).
22. 5DTech (технология 5D-печати) // Tadviser: сайт. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:5DTech_%28%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F_5D-%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%B0%D1%82%D0%B8%29 (дата обращения: 27.11.2024).
23. 10 правил подготовки модели к 3D печати // Хабр: сайт. URL: <https://habr.com/ru/articles/196182/> (дата обращения: 27.11.2024).

Кинжагулов Игорь Юрьевич
Попов Глеб Дмитриевич
Колганов Олег Александрович

Аддитивные технологии в цифровом производстве
Учебно-методическое пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А