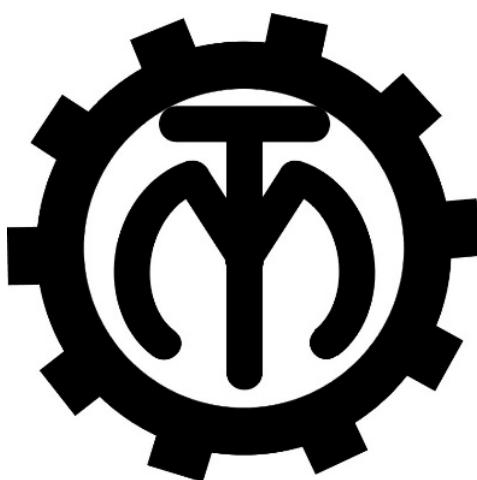


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технология машиностроения»

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам для
студентов специальности 1-36 01 04 «Оборудование и технологии
высокоэффективных процессов обработки материалов»
очной формы обучения*



Могилев 2022

УДК 621.9.044
ББК 34.5-5-05
А28

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технология машиностроения» «24» января 2022 г.,
протокол № 7

Составители: канд. техн. наук, доц. В. М. Шеменков;
канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова;
С. Г. Полторацкий;
Е. Ю. Демиденко

Рецензент Д. М. Свирепа

Изложены методические рекомендации по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Аддитивные технологии», а также теоретические положения в области проектирования технологических процессов изготовления деталей на основе технологий аддитивного производства.

Учебно-методическое издание

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Ответственный за выпуск	В. М. Шеменков
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ № .

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2022

Содержание

Инструкция по охране труда при проведении лабораторных работ	4
1 Проектирование технологических процессов изготовления деталей на основе технологий аддитивного производства.....	5
2 Подготовка трехмерных моделей деталей для изготовления методами на основе технологий аддитивного производства.....	13
3 Трехмерное сканирование и основы работы с 3D-сканером модели EinScan-Pro.....	32
4 Изготовление деталей методом FDM-печати и основы работы на 3D-принтере.....	36
5 Изготовление металлических деталей методом SLM-печати и основы работы на 3D-принтере модели EP-M250.....	40
Список литературы.....	48

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 Проектирование технологических процессов изготовления деталей на основе технологий аддитивного производства

Цель работы: освоение методики проектирования технологических процессов изготовления деталей на основе технологий аддитивного производства с соблюдением принципов рациональности, производительности, экономичности, обеспечения качества и технических требований.

1.1 Производственные технологии

Большинство производственных технологий можно отнести к одной из трех групп. На простейшем уровне эти группы можно определить как:

1) *формовочное производство*: лучше всего подходит для крупно-серийного производства одной и той же детали, требующего больших первоначальных инвестиций в оснастку (пресс-формы), но затем способного производить детали по очень низкой цене за единицу продукции;

2) *субтрактивное производство*: лучше всего подходит для деталей с относительно простой геометрией, производимых в малых и средних объемах;

3) *аддитивное производство (АП)*: лучше всего подходит для мелко-серийных сложных конструкций, которые формовочными или субтрактивными методами не могут быть произведены. Обычно используется для уникальных быстрых прототипов или деталей для конечного использования.

Стоимость любого типа производства в основном связана с объемом производства, а производительность изготовления детали сильно зависит от её геометрии.

Технологическая цепочка формовочного производства: чертеж – подготовка модельного комплекта – подготовка материалов для изготовления литейной формы – формовка – плавка материала – заливка формы – охлаждение формы – извлечение отливки – термообработка – очистка отливок – термообработка – контроль – среднее количество отходов.

Технологическая цепочка субтрактивного производства: чертеж – разработка технологического процесса, выбор оборудования, режущего и вспомогательного инструмента, технологической оснастки – разработка и изготовление специального режущего и вспомогательного инструмента, технологической оснастки – получение заготовки – субтрактивные методы изготовления деталей и термообработка – постобработка (слесарная операция, промывка, мойка, маркировка и др.) – деталь и её контроль – большое количество отходов.

Технологическая цепочка аддитивного производства: чертеж – CAD-модель – оптимизированная CAD-модель – разработка технологического процесса, выбор оборудования, выбор материала (порошок, филамент, смола и др.) – STL-файл – слайсинг и генерация управляющей программы – аддитивные методы изготовления деталей – постобработка – деталь и её контроль – малое количество отходов.

STL (от англ. stereolithography) – формат файла, широко используемый для хранения трёхмерных моделей объектов для использования в аддитивных технологиях. Информация об объекте хранится как список треугольных граней, которые описывают его поверхность, и их нормалей.

Слайсинг (от англ. slicing) – процесс перевода STL-файла трёхмерной модели в управляющий код. Модель режется (слайстится) по слоям. Каждый слой состоит из периметра и/или заливки. Модель может иметь разный процент заполнения заливкой, также заливки может и не быть (пустотелая модель).

Постобработка (от англ. post-processing) – процесс или последовательность операций, которую необходимо совершить с изделием или материалом, перед или после 3D-печати, для получения необходимых характеристик детали и преодоления ограничений аддитивного производства.

Ключевым аспектом аддитивного производства является его способность создавать детали со сложной и оптимизированной геометрией. Это означает, что данный тип производственных технологий идеально подходит для изготовления высокопроизводительных деталей. С другой стороны, он не масштабируется так же хорошо, как обработка на станках с ЧПУ или литьё при больших объёмах.

1.2 Технологии аддитивного производства

В 2015 г. был создан стандарт ISO/ASTM 52900, а в 2017 г. – ГОСТ Р 57558–2017 / ISO/ASTM 52900:2015 с целью стандартизации всей терминологии и классификации каждого типа аддитивного производства.

В общей сложности на сегодняшний день выявлено и установлено семь категорий процессов аддитивного производства. Эти семь процессов 3D-печати породили множество различных типов технологий, которые сегодня используют 3D-принтеры [1–3].

1 *Экструзия материала (material extrusion)*: процесс, в котором материал выборочно подается через сопло или жиклер (рисунок 1.1).

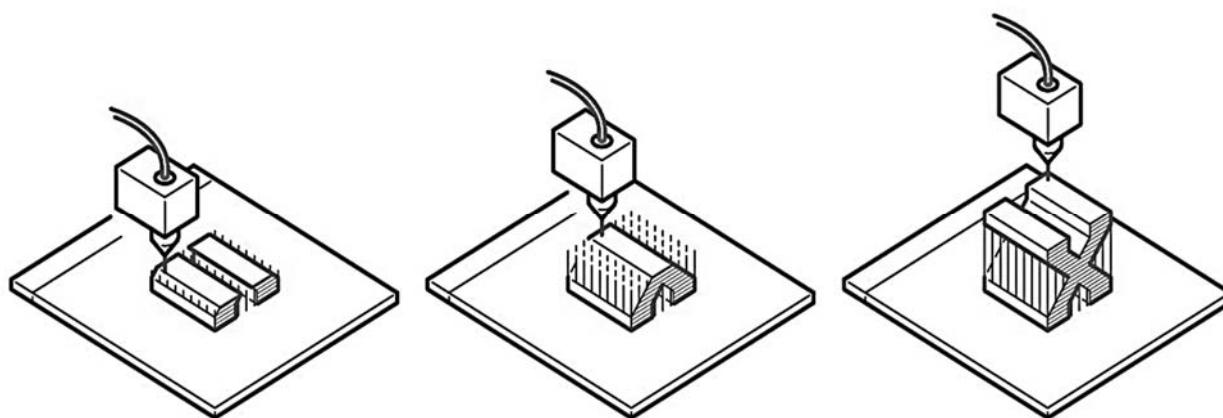


Рисунок 1.1 – Принцип процесса экструзии материала (material extrusion)

Типы технологии: fused deposition modeling (FDM) или fused filament fabrication (FFF).

Материалы: полимерный филамент (PLA, ABS, PET, PETG, TPU, Nylon, ASA, PC, HIPS, PEEK, PEI, PPE, PP, PE, PS, PA12, PA11, PA6, углеродное волокно и др.), металлизированный филамент и др.

Размерная точность: $\pm 0,5\%$ (нижний предел $\pm 0,5$ мм).

Область применения: корпуса электрических устройств, быстрое прототипирование, модели для литья по выплавляемым моделям и др.

Преимущества: низкая стоимость; время выполнения печати приемлемое; технология достаточно доступна; широкий выбор материалов и расцветки.

Недостатки: самая низкая размерная точность и разрешение по сравнению с другими технологиями 3D-печати, поэтому она не подходит для моделей со сложной геометрией и мелкими деталями; конечный продукт будет иметь видимые линии слоев, поэтому для лучшего вида требуется постобработка; механизм адгезии слоя делает детали анизотропными.

Постобработка: удаление поддержки (support removal): стандартные и растворимые; шлифование (sanding); холодная сварка (cold welding); заполнение пропусков (gap filling); полировка (polishing); грунтовка и покраска (priming and painting); сглаживание парами растворителя (vapor smoothing); погружение в растворитель (dipping); эпоксидное покрытие (epoxy coating); металлическое покрытие (metal plating).

2 Фотополимеризация в ванне (vat photopolymerization): процесс, в котором жидкий фотополимер выборочно отверждается (полимеризуется) в ванне световым излучением (рисунок 1.2).

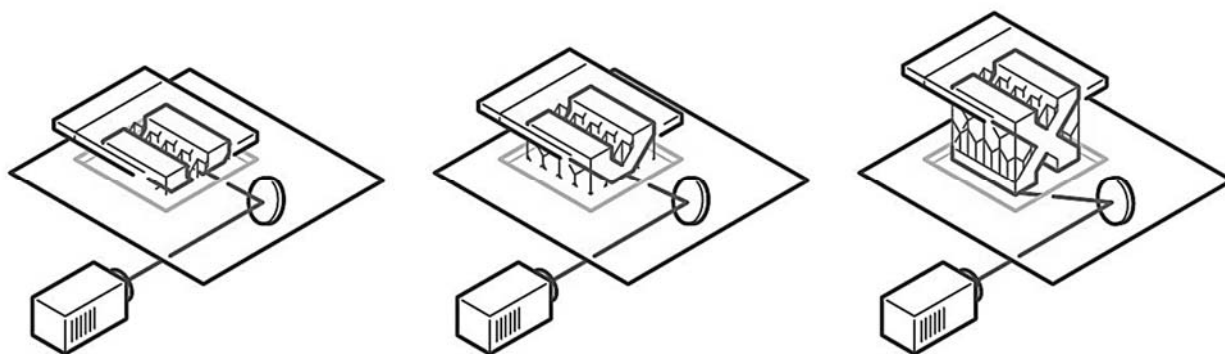


Рисунок 1.2 – Принцип процесса фотополимеризации в ванне (vat photopolymerization)

Типы технологии: stereolithography (SLA), masked stereolithography (MSLA), microstereolithography (μ SLA) и др.

Материалы: фотополимерные смолы.

Размерная точность: $\pm 0,5\%$ (нижний предел $\pm 0,15$ мм или 5 нм с μ SLA).

Область применения: полимерные прототипы, подлежащие изготовлению методом литья под давлением; ювелирное литье; стоматологическое применение.

Преимущества: высокая точность размеров; возможность получения деталей со сложной геометрией; детали будут иметь очень гладкую поверхность, что делает их идеальными, например для визуальных прототипов.

Недостатки: детали, как правило, хрупкие и не подходят для функциональных прототипов; механические свойства и внешний вид этих деталей со временем ухудшаются; поддержки и постобработка при печати требуются всегда.

Постобработка: промывка; дополнительная засветка фотополимерной смолы; удаление элементов поддержки; шлифование; склеивание; грунтовка; покраска и др.

3 Синтез на подложке (*powder bed fusion*): процесс, в котором энергия от внешнего источника используется для избирательного спекания/сплавления предварительно нанесенного слоя порошкового материала (рисунок 1.3).

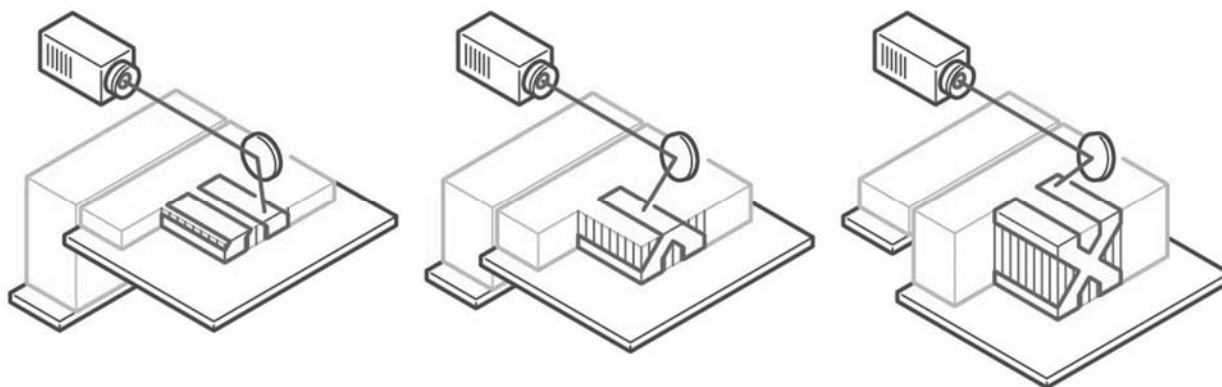


Рисунок 1.3 – Принцип процесса синтеза на подложке (*powder bed fusion*)

Типы технологии: selective laser sintering (SLS), selective laser melting (SLM), electron beam melting (EBM), direct metal laser sintering (DMLS), multi jet fusion (MJF).

Материалы: термопластичные порошки (Nylon 6, Nylon 11, Nylon 12 и др.), металлические порошки (сталь, титан, алюминий, кобальт и др.), керамические порошки.

Размерная точность: $\pm 0,3\%$ (нижний предел $\pm 0,3$ мм).

Область применения: функциональные детали, сложные воздухопроводы (полые конструкции), мелкосерийное производство деталей.

Преимущества: возможность изготовления функциональных деталей со сложной геометрией, которую традиционные методы производства не смогут обеспечить; детали могут быть оптимизированы; отличные механические свойства готовых деталей.

Недостатки: высокие затраты и стоимость расходного материала; размер рабочей области ограничен.

Постобработка: отделение моделей от стола (резка на проволочном электроэрозионном станке, резка на ленточнопильном станке, резка на дисково-отрезном станке); удаление порошка в полостях и элементов поддержки; терми-

ческая обработка (термический отжиг) для снятия остаточных напряжений и улучшения механических свойств детали; обработка на металлорежущих станках (обработка отверстий, резьбы и др.); пескоструйная обработка; галтование; шлифование; полировка и др.

4 *Прямой подвод энергии и материала (directed energy deposition)*: процесс, в котором энергия от внешнего источника используется для соединения материалов путем их сплавления в процессе нанесения (рисунок 1.4).

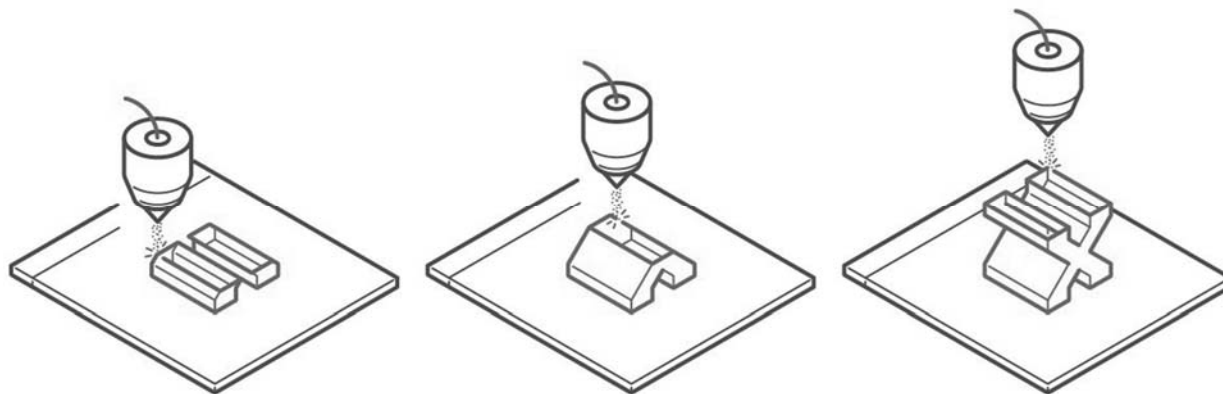


Рисунок 1.4 – Принцип процесса прямого подвода энергии и материала (directed energy deposition)

Типы технологии: laser engineered net shaping (LENS); electron beam additive manufacturing (EBAM); cold spray.

Материалы: металлы (проволока, порошок).

Размерная точность: $\pm 0,1$ мм.

Область применения: ремонт высококачественных автомобильных и аэрокосмических компонентов; функциональные прототипы и готовые детали.

Преимущества: поддерживающие конструкции требуются редко; смешивание металлов; работа в трёх координатах; высокая плотность и механическая прочность распечатков; возможность печатать прямо на готовом объекте.

Недостатки: низкое качество финишной поверхности, требующей последующей обработки; высокая стоимость; необходимость прочной поддержки.

Постобработка: термообработка; фрезерование, шлифование, полирование, и другие операции, характерные в том числе для ремонта и восстановления деталей.

5 *Струйное нанесение связующего (binder jetting)*: процесс, в котором порошковые материалы соединяются выборочным нанесением жидкого связующего (рисунок 1.5).

Типы технологии: binder jetting (BJ).

Материалы: песок, полимер или металлический порошок: нержавеющая сталь / бронза, полноцветный песок, кремнезём (литье в песчаные формы); металлокерамические композиты.

Размерная точность: $\pm 0,2$ мм (металл) или $\pm 0,3$ мм (песок).

Область применения: функциональные металлические детали, полноцветные модели, литьё в песчаные формы.

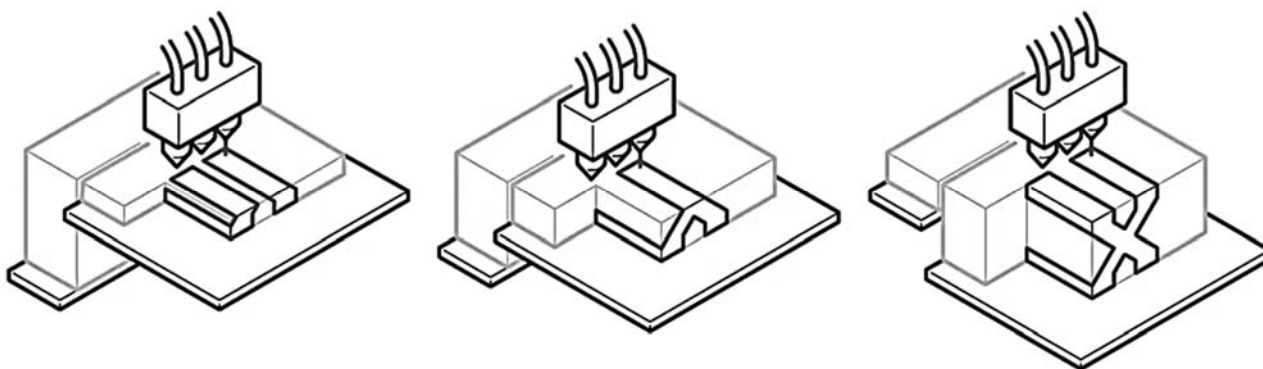


Рисунок 1.5 – Принцип процесса струйного нанесения связующего (binder jetting)

Преимущества: низкая стоимость; высокая производительность при производстве малых и средних партий; высокая точность; нет ограничений по габаритным размерам; улучшенные свойства готовой продукции; возможность изготовления изделий со сложной геометрией; возможность печати полноцветных прототипов; отсутствие деформации при печати; отсутствие поддержек; возможность использовать оставшийся после печати материал для новой распечатки.

Недостатки: высокая пористость моделей, что приводит к меньшей механической прочности; хрупкость детали в процессе до термообработки; необходимость закладывать разницу в размерах на усадку при печати моделей под запекание; ограниченное количество материалов.

Постобработка: термообработка (инфильтрация, спекание); обработка на металлорежущих станках (обработка отверстий, резьбы и др.); пескоструйная обработка; шлифование; полировка и др.

6 Струйное нанесение материала (*material jetting*): процесс, в котором изготовление объекта осуществляют нанесением капель строительного материала (рисунок 1.6).

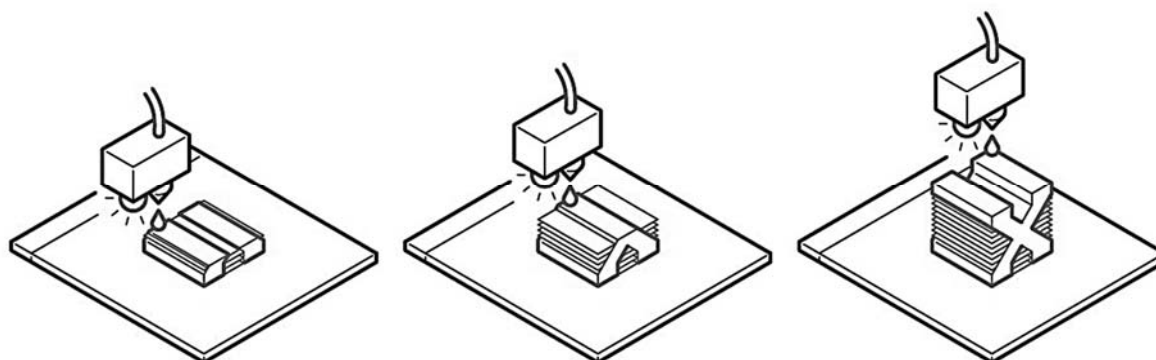


Рисунок 1.6 – Принцип процесса струйного нанесения материала (*material jetting*)

Типы технологии: *material jetting* (MJ), *drop on demand* (DOD).

Материалы: фотополимерная смола (стандартная, литьевая, прозрачная, высокотемпературная).

Размерная точность: $\pm 0,1$ мм.

Область применения: полноцветные прототипы продукции; прототипы,

изготовленные методом литья под давлением; пресс-формы для литья под давлением; медицинские модели.

Преимущества: высокая точность и детализация (печать очень тонких слоёв); доступность полноцветного и мультиматериального производства; гладкая поверхность распечатков.

Недостатки: хрупкость, не подходит для механических частей; высокая стоимость принтеров и материалов для печати.

Постобработка: дополнительная засветка фотополимерной смолы; удаление элементов поддержки и остатков смолы; шлифование; склеивание; грунтовка; окрашивание и др.

7 *Листовая ламинация (sheet lamination)*: процесс, в котором изготовление детали осуществляется послойным соединением листовых материалов (рисунок 1.7).

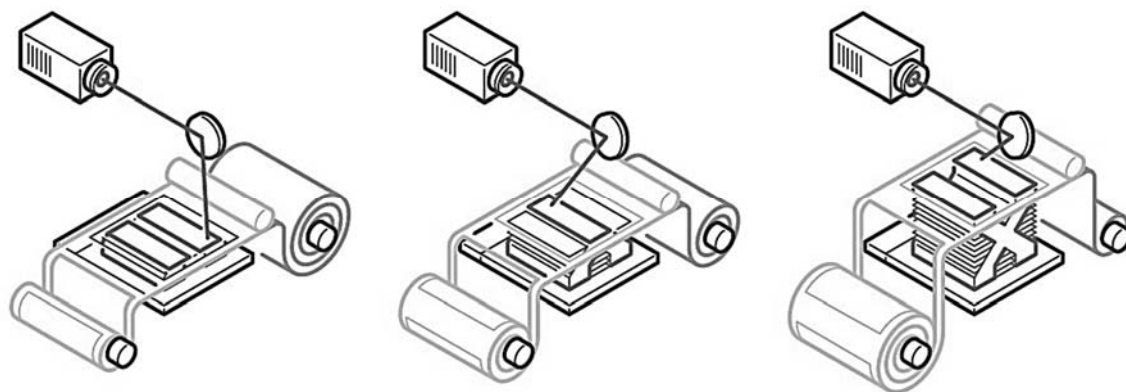


Рисунок 1.7 – Принцип процесса листовой ламинации (sheet lamination)

Типы технологии: laminated object manufacturing (LOM), ultrasonic consolidation (UC) и др.

Материалы: бумага, полимеры и металлы в листовой форме.

Размерная точность: $\pm 0,1$ мм.

Область применения: нефункциональные прототипы, многоцветная печать, формы для литья.

Преимущества: низкая стоимость; возможность быстрого изготовления; составная печать; производство крупных моделей.

Недостатки: низкая точность; много отходов; много постобработки; невысокая прочность моделей; ограниченность применения; низкое разрешение печати (толщина слоя равна толщине материала).

Постобработка: шлифование; полирование; механическая обработка отверстий и полостей; окрашивание и др.

1.3 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Получить чертеж или CAD-модель детали у преподавателя.

2 Проанализировать информацию о детали: объем выпуска, размеры и допуски, сложность геометрии, материал, функциональное назначение.

3 Проанализировать применение различных методов производственных технологий и составить технологическую цепочку изготовления детали одним из типов технологии аддитивного производства.

4 Оформить отчёт.

1.4 Содержание отчета

Отчёт по лабораторной работе выполняется на отдельных листах бумаги или в тетради. Он должен содержать следующее:

- название лабораторной работы;
- цель работы;
- анализ информации о детали;
- технологическая цепочка изготовления детали;
- ответы на контрольные вопросы;
- выводы.

Контрольные вопросы

1 В чем отличие технологической цепочки аддитивного производства от цепочек других производственных технологий?

2 Какие категории процессов аддитивного производства Вы знаете?

3 Какие категории процессов и типы технологии аддитивного производства предназначены для получение деталей из металлов?

4 Какие категории процессов и типы технологии аддитивного производства предназначены для получение деталей из полимеров?

5 Какие категории процессов и типы технологии аддитивного производства предназначены для получение деталей из фотополимерной смолы?

6 Какие категории процессов и типы технологии аддитивного производства предназначены для получение деталей из композитов?

7 Какие категории процессов и типы технологии аддитивного производства предназначены для получение деталей из бумаги?

8 Какие категории процессов и типы технологии аддитивного производства предназначены для получение деталей из песка?

9 Что такое постобработка?

10 Какие операции может в себя включать постобработка?

2 Подготовка трехмерных моделей деталей для изготовления методами на основе технологий аддитивного производства

Цель работы: освоение методики проектирования и оптимизации трехмерных моделей деталей для изготовления методами на основе технологий аддитивного производства.

2.1 Этапы подготовки модели к печати

Из технологической цепочки аддитивного производства можно выделить этапы, связанные с подготовкой трехмерной модели к печати: чертеж – САД-модель – оптимизированная САД-модель – ... – STL-файл – слайсинг и генерация управляющей программы –

Рассмотрим каждый из этих этапов.

Этап 1. Чертеж и САД-модель.

На первых этапах жизненный цикл «аддитивно-технологичного» изделия почти не отличается от традиционного. Чертежи и 3D-модели создаются теми же САПР (Компас-3D, SolidWorks, AutoCAD, Autodesk Inventor, NX, CATIA и др.). Правда уже здесь у конструктора на порядок больше свободы – деталь может быть более сложной формы, легче и функциональнее обычной.

Этап 2. Оптимизированная САД-модель.

Для пользователя программного обеспечения оптимизации (Autodesk Netfabb, Autodesk Within, Materialise Magics, ANSYS SpaceClaim и др.) этот этап начинается с импорта модели из САПР. Здесь неоценимую помощь ему окажет возможность прямого импорта данных из самых распространенных САПР и поддержка широкого набора нейтральных форматов файлов, в том числе STL-файлы и файлы после слайсинга.

Специальные модули оптимизации, встроенные в программное обеспечение, позволяют автоматизировано превращать обычные САПР-модели в облегченную систему из оболочек и внутренней решетчатой структуры переменной плотности, которая при этом сохранит необходимую надежность. Детали в этом случае могут быть оптимизированы по массе, объему, прочности, технологичности исполнения на выбранном принтере и по еще целому ряду характеристик. Конструктор может даже изменить свойства самого материала печати как для всей модели, так и для отдельных ее участков. Можно создавать пористые участки и гладкие, упругие и жесткие, причем упругость может быть анизотропной (неравной по разным осям). Типовой процесс оптимизации представлен на рисунке 2.1.

Этап 3. STL-файл.

На этом этапе выполняется обработка данных – конвертация, исправление сетки (при необходимости) и др.

Новый формат файлов для аддитивного производства (AMF), который впоследствии заменит формат файлов STL, был разработан группой экспертов технического комитета ИСО по аддитивному производству ИСО/ТК 261,

в партнерстве с ASTM International.

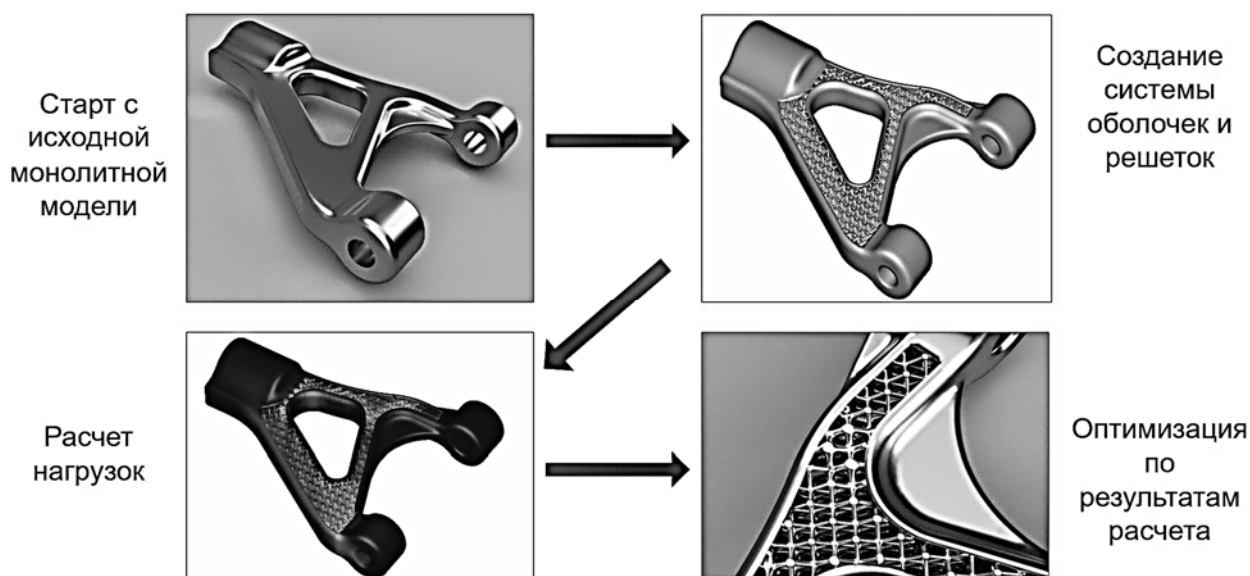


Рисунок 2.1 – Оптимизация структуры крепёжного элемента

Этап 4. Слайсинг (нарезка) и генерация управляющей программы.

После формирования STL-файла полученную модель нужно подготовить к печати – оптимально разместить модели деталей в рабочем пространстве принтера, добавить структуру опор, разбить модель на слои, сгенерировать траектории инструмента под выбранную технологию печати. В завершении необходимо проанализировать деталь и провести имитацию процессов печати для предсказания и исключения возможных ошибок.

Структура опор необходима для частей детали, которые нависают над платформой, не имея снизу уже пропечатанного материала. Чтобы эти части при печати не отвалились от модели или не покоробили всю модель, под ними моделируются временные, тонкие и легко удаляемые после производства структуры – так называемые «поддержки». В программном обеспечении они, в большинстве случаев, создаются автоматически. Хотя, конечно, инструменты ручного их создания и редактирования тоже предусмотрены. Поддержки бывают разных типов: прямые, ветвящиеся, древовидные, стеночные, объемные или комбинированные.

Кроме того, программное обеспечение может автоматически предложить пользователю оптимальные варианты ориентации детали при печати, исходя из соотношения объема поддержек, общей поддерживаемой площади и общего времени печати. Пользователю останется только выбрать наиболее подходящий вариант ориентации из списка, предложенного системой.

Инструменты пакования деталей в рабочее пространство принтера – это размещения множества деталей в области построения для одновременной печати. Автоматическое пакование позволяет достигать небывалой плотности размещения деталей, недостижимой в случае ручного расположения. Благодаря

этому за одну операцию печати можно изготовить максимально возможное количество деталей, сэкономив не только время, но и материалы.

В программном обеспечении могут использоваться различные алгоритмы пакования – плоские, трехмерные, контурные. Для технологий печати, не требующих поддержек, возможно расположение детали друг над другом максимально тесно. Вокруг групп мелких деталей можно автоматически генерировать временные легкие коробки, чтобы детали при извлечении не растерялись. При трехмерном размещении программное обеспечение будет следить даже за тем, чтобы детали не сцепились и не переплелись между собой.

Аналитический модуль программного обеспечения предназначен для исследования и имитации печати. Он позволяет заранее обнаружить и исключить множество потенциальных проблем печати. На основании виртуальной имитации процесса печати он предскажет, рассчитает и визуализирует остаточные напряжения и деформации детали, возникающие от неравномерного нагрева в процессе печати. Более того, он предложит автоматически компенсировать эти деформации, особым образом изменив модель перед печатью. Модуль также может предсказать разрыв системы поддержек в результате деформации детали. Предсказание и предварительная компенсация остаточных напряжений и деформаций детали позволяет в разы сократить количество требуемых итераций печати до получения идеального результата. Это, естественно, снижает себестоимость всего производства и радикально ускоряет его.

При всех операциях подготовки и настройки печати программное обеспечение позволяет учитывать параметры и специфику конкретной машины. В него может быть встроена обширная библиотека оборудования или же оператор может задать параметры вручную. Выбор машины из библиотеки автоматически устанавливает необходимые параметры подготовки к печати и ограничивает область построения.

По итогам контроля готовой детали можно внести корректировки в предыдущие этапы.

2.2 Инструменты для оптимизации дизайна

Современные CAD-/CAM-/CAE-пакеты предлагают инструменты, которые помогают в полной мере воспользоваться геометрической свободой 3D-печати. Используя эти инструменты проектирования на основе встроенных алгоритмов, можно создавать структуры, подобные органическим, которые превосходят детали, разработанные с использованием традиционных методов.

На сегодняшний момент принято использовать три основные стратегии построения трехмерных моделей деталей для 3D-печати. Эти стратегии могут либо оптимизировать производительность существующей конструкции, либо помочь в создании структур с нуля на основе набора требований к детали.

Решетчатые структуры. Применение решетчатого узора – отличный способ оптимизировать существующий дизайн (рисунок 2.2). Решетчатые структуры помогают создавать легкие детали, максимально увеличивать

площадь поверхности теплообменников или улучшать возможности печати и снижать стоимость производства существующей конструкции.



Рисунок 2.2 – Пример решетчатой структуры

Оптимизация топологии. Оптимизация топологии на основе моделирования помогает создавать конструкции с минимальной массой и максимальной жесткостью (рисунок 2.3). При оптимизации топологии определяемое пользователем проектное пространство и варианты нагрузки анализируются для определения областей, из которых можно удалить материал. Затем результат моделирования можно использовать для проектирования деталей с оптимальными характеристиками для подобных сценариев нагрузки.

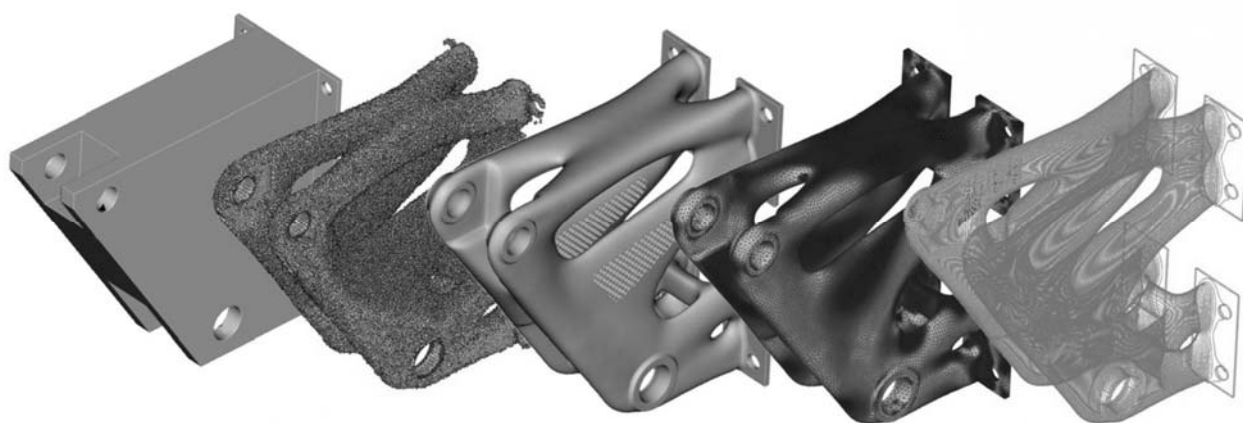


Рисунок 2.3 – Пример оптимизации топологии

Порождающее моделирование (генеративный дизайн). Порождающее моделирование – это разновидность процесса оптимизации топологии на основе моделирования (рисунок 2.4). В генеративном дизайне вместо одного вывода анализ создает несколько вариантов дизайна. Все полученные конструкции пригодны для изготовления и соответствуют проектным требо-

ваниям. Таким образом, конструктор может изучить различные решения и выбрать то, которое подходит для производства (например, на основе вторичных критериев выбора).

В отличие от традиционных инструментов дизайна и проектирования, генеративные системы полуавтономно создают и первично отбирают варианты решений, что изменяет характер взаимодействия человека с системой: программа воспринимается не как средство, а как полноценный участник творческого процесса.

Некоторые генеративные системы позволяют пользователю переформулировать, корректировать и уточнять задачу по промежуточным результатам, а также самообучаются в процессе поиска решений.




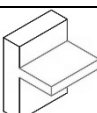
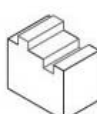

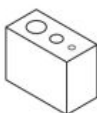
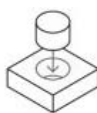
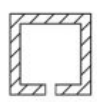




Рисунок 2.4 – Пример генеративного дизайна

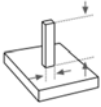


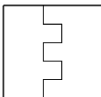

2.3 Дизайн для аддитивного производства (DfAM)

Даже при использовании передовых инструментов САПР конструктор при подготовке чертежа или CAD-модели детали и изделия в целом должен следовать определенным правилам проектирования дизайна. Они связаны с базовой механикой процессов 3D-печати. Список наиболее важных правил дизайна для различных типов технологий аддитивного производства представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Правила дизайна для аддитивного производства

Элемент конструкции			Технология					
Характеристика	Единица измерения	Эскиз	FDM	SLA	SLS	DMLS (SLM)	BJ	MJ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Минимальная толщина опорных стенок	мм		0,8	0,4	0,7	0,4	2	1
Минимальная толщина свободных стенок	мм		0,8	0,6	0,8	0,5	3	0,5
Поддержки и нависания	град		45	19	Не нужны	Всегда	н/д ¹	Всегда
Растворимые поддержки			+ ²	н/д	н/д	– ³	н/д	+
Нависания (вылет) без поддержек	мм		н/д	1	н/д	0,5	20	0,5
Рельефы и гравировка ($\frac{\text{ширина}}{\text{высота/глубина}}$)	мм		$\frac{0,6}{2}$	$\frac{0,4}{0,1/0,4}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,1}{0,1}$	$\frac{0,5}{0,5}$	$\frac{0,5}{0,5}$
Перемычки	мм		5	21 широкие	н/д	2	н/д	н/д
Минимальный диаметр отверстия	мм		Ø2	Ø0,5	Ø1,5	Ø1,5	Ø1,5	Ø0,5
Зазор между сопрягаемыми деталями ($\frac{\text{неподвижные}}{\text{подвижные}} \frac{\text{монтажные}}$)	мм		$\frac{0,5}{0,5}$ н/д	$\frac{0,1}{0,5}$ 0,2	$\frac{0,1}{0,3}$ н/д	н/д	н/д	$\frac{0,2}{0,2}$ н/д
Отверстия для извлечения материала	мм		н/д	Ø4	Ø3,5	Ø5	Ø5	н/д
Минимальный размер элемента	мм		2	0,2	0,8	0,6	2	0,25
Диаметр стержня (штифта)ы	мм		3	0,5	0,8	1	2	0,5

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Максимальное соотношение сторон (высота : ширина)			н/д	н/д	н/д	8:1	8:1	8:1
Галтели (радиусы)	мм		н/д	н/д	0,4	н/д	1	н/д
Текст	мм		н/д	0,1	2	н/д	н/д	н/д
Ось	мм		н/д	н/д	0,3 (для ХОДОВЫХ осей)	н/д	н/д	н/д
Взаимосвязанные элементы (замковые элементы)	мм		0,5	0,2	0,2	н/д	н/д	0,1
Резервуары	мм		н/д	2	1	н/д	н/д	н/д
Живой шарнир ($\frac{\text{толщина}}{\text{длина}}$)	мм		0,4...0,6 (2 слоя) н/д	н/д	$\frac{0,3...0,8}{5}$	н/д	н/д	$\frac{0,4...0,8}{\text{н/д}}$
Толщина слоя	мкм		50...400	25...100	80...120	30...50	100	16...30
Резьба (резьбовые вставки)			+	+	+	-	-	+
Резьба (закладные гайки)			+	+	+	+	+	+
Резьба (саморезы)			+	+	+	-	-	+
Резьба (нарезание резьбы)			+	+	+	+	+	+
Резьба (3D-печать)			+	+	+	+	+	+
Усадка	%		0,2...1	н/д	3-3,5	н/д	н/д	-

Окончание таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Деформации			+	+	н/д	н/д	н/д	–
Многоцветность			–	–	–	–	–	+
Мультиматериальная печать			+	+	н/д	н/д	н/д	+
Текстура поверхности (<u>глянцевый</u> матовый)			н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	$\frac{+}{-}$ +
Водонепроницаемость			н/д	+	н/д	н/д	н/д	н/д
Изотропность			–	+	н/д	+	н/д	н/д
Ориентация			+	+	+/- ⁴	+	–	+/-
Размерная точность (настольный принтер)			±0,5 % (нижний предел ±0,5 мм)	±0,5 % (нижний предел ±0,15 мм)	±0,3 % (нижний предел ±0,3 мм)	±0,1 мм	±0,2 мм (металл); ±0,3 мм (песок)	±0,1 мм
Размерная точность (промышленный принтер)			±0,15 % (нижний предел ±0,02 мм)	±0,15 % (нижний предел ±0,01 мм)				
<p><i>Примечания</i></p> <p>1 Знак «н/д» – нет данных.</p> <p>2 Знак «+» – характеристика присуща для технологии или важна.</p> <p>3 Знак «–» – характеристика не присуща для технологии или не важна.</p> <p>4 Знак «+/-» – характеристика присуща для технологии или не сильно важна</p>								

Описание элементов конструкции.

1 *Опорные стенки* – это стенки, соединенные с остальной частью распечатка как минимум с двух сторон.

ВJ: минимальная толщина опорных стенок гарантирует, что деталь может быть извлечена из порошка и обработана в сыром состоянии без повреждения.

2 *Свободные стенки* – это неподдерживаемые стенки, соединенные с остальной частью, распечатка менее чем с двух сторон.

BJ: минимальная толщина свободных стенок (включая плавники и ребра) гарантирует меньший риск повреждения во время обработки.

SLA: тонкие свободные стенки должны иметь закругленные основания (там, где стенка соединяется с остальной частью распечатка), чтобы уменьшить концентрацию напряжений вдоль стыка.

3 *Поддержки и нависания* характеризуются максимальным углом наклона стенок, которые могут быть напечатаны без использования поддержек. Также поддержки характеризуются возможностью отделения от модели при помощи растворения.

FDM: под углом 45° вновь напечатанный слой опирается на 50 % предыдущего слоя. Это создает достаточную поддержку и адгезию, на которые можно опираться. При углах выше 45° необходима поддержка, чтобы вновь напечатанный слой не выпирал вниз и не отходил от сопла. Еще одна проблема, возникающая при печати выступов, – это скручивание. Новый слой становится тоньше на краю выступа. Это приводит к дифференциальному охлаждению, заставляя его деформироваться вверх. Ключевой момент при проектировании: вы можете преодолеть ограничения, связанные с выступами, используя опоры для углов стены более 45° . Для больших выступов, требующих поддержки, ожидайте, что на окончательной поверхности будут присутствовать дефекты, если они не прошли постобработку.

SLA: рекомендуется ориентировать деталь таким образом, чтобы визуальнo важные поверхности не соприкасались с опорными конструкциями. Если только модель не печатается без соответствующих внутренних и внешних опорных конструкций, выступы не представляют большой проблемы при печати. Печать без поддержек часто приводит к короблению отпечатка, но если необходимо печатать без поддержек, любые неподдерживаемые выступы должны соответствовать рекомендациям. Технологии печати «сверху вниз» и «снизу вверх» используют поддержку по-разному.

DMLS, SLM: металлическая печать плавит или спекает слои порошка при очень высокой температуре. Из-за этого для каждого слоя требуется что-то «твердое», а не просто рассыпчатая пудра, как в процессе SLS. Для этого для секций, не прикрепленных к рабочему столу, сначала печатаются опорные конструкции, а затем поверх них строятся твердые секции. Остаточное напряжение, возникающее в результате дифференциального охлаждения, означает, что каждый слой металлического распечатка стремится свернуться и деформироваться. Добавление поддержки помогает отводить тепло от недавно напечатанных участков, а также закреплять их на твердом основании. Поддержка увеличивает стоимость сборки (поскольку она использует дополнительный материал), а также должна быть удалена после завершения печати. Поверхности, соприкасающиеся с опорой, всегда требуют некоторой последующей обработки для достижения такой же чистоты поверхности, как у деталей, где опора не требовалась.

MJ: одним из самых больших преимуществ струйной печати материалов является то, что все детали печатаются из двух разных материалов; один для основного строительного материала, а второй в качестве растворимой

поддержки. Это означает, что в отличие от других методов 3D-печати, при которых опору необходимо вручную отрезать от детали, опора растворяется и легко удаляется. При правильной постобработке это может привести к тому, что поверхность вообще не будет иметь никаких признаков поддержки. Это также означает, что ориентация деталей гораздо более гибкая, чем другие технологии 3D-печати. Это в сочетании с относительной однородностью материалов, изготавливаемых с помощью струйной печати, обеспечивает большую свободу проектирования и позволяет создавать очень сложные и замысловатые конструкции.

4 Нависания (вылет) без поддержек характеризуются максимальным вылетом стенок, которые могут быть напечатаны без использования поддержек. Рекомендуется рассматривать возможность устранения нависания (вылета), добавив фаску под неподдерживаемые кромки.

ВJ: хотя для технологии окружающие детали из порошка обеспечивают поддержку на этапах построения, незакрепленные края подвержены высокому риску поломки при обработке в сыром состоянии.

5 Рельефы и гравировка – элементы на модели, которые приподняты или утоплены ниже поверхности модели.

SLA: если элементы слишком малы, эти элементы, которые впечатаны или утоплены в модели, рискуют слиться с остальной частью модели во время печати.

6 Перемычки (мосты) характеризуются размером горизонтального участка, который технология печати может обеспечить без необходимости применения поддержек.

FDM: образование мостов происходит, когда принтер должен печатать между двумя опорами или опорными точками. Поскольку строить не на чем, первоначальный печатаемый слой не поддерживается, и материал имеет тенденцию провисать. Мосты чаще всего встречаются в отверстиях по горизонтальной оси. Одним из решений является уменьшение расстояния перемычки, но эффект от этого зависит от конструктивных ограничений детали. Еще одно решение, позволяющее избежать провисания – добавить поддержку. Поддержка обеспечивает временную платформу для создания связующего уровня. Поддерживающий материал удаляется после завершения печати, хотя он может оставить следы или повредить поверхность, где поддержка была соединена с деталью. Если требуется гладкая, ровная поверхность, передовым решением будет разделение дизайна на отдельные части или выполнение какой-либо формы постобработки.

SLA: перемычки между двумя точками на модели можно успешно напечатать, но более широкие горизонтальные перемычки должны быть короче, чем тонкие перемычки. Широкие перемычки имеют большую площадь контакта по оси Z, что увеличивает вероятность сбоя печати во время отслаивания.

7 Минимальный диаметр отверстия – диаметр отверстия с наименьшими размерами, который технология печати может обеспечить. Отверстия, по возможности, должны быть ориентированы вертикально, чтобы обеспечить округлость элемента.

FDM: процесс печати вертикального отверстия и причину уменьшения его диаметра можно резюмировать следующим образом. Когда сопло печатает периметр отверстия по вертикальной оси, оно прижимает вновь напечатанный слой к существующим слоям, чтобы улучшить адгезию. Сила сжатия сопла деформирует экструдированный круглый слой из круга в более широкую и плоскую форму. Это увеличивает площадь контакта с ранее напечатанным слоем, улучшая адгезию, но расширяя экструдированный сегмент, что приводит к уменьшению диаметра печатаемого отверстия. Это уменьшение может быть проблемой, особенно при печати отверстий малого диаметра, где эффект больше из-за отношения диаметра отверстия к диаметру сопла. Если диаметр отверстия вертикальной оси имеет решающее значение, рекомендуется напечатать его меньшего размера, а затем просверлить отверстие до нужного диаметра.

SLA: если диаметр отверстий слишком мал по осям X, Y и Z, то отверстия могут закрыться во время печати.

8 *Сопрягаемые детали* характеризуются рекомендуемым зазором между двумя сопрягаемыми деталями (подвижными и неподвижными). Этот зазор также должен быть каким-то образом доступен для очистки/удаления поддерживающего материала, который может скапливаться в зазоре.

9 *Отверстия для извлечения материала* характеризуются минимальным диаметром выхода для извлечения строительного материала (например, металлического нерасплавленного порошка из полых детали). Использование нескольких выпускных отверстий значительно упростит удаление материала.

10 *Минимальный размер элемента* характеризуется наименьшим размером единичного элемента с обеспечением того, что печать пройдет без ошибок.

VJ: основной проблемой минимального размера элемента является возможность его повреждения. Хотя этот процесс позволяет производить детали с очень мелкими деталями, проблема заключается в обращении с очень хрупкими деталями в сыром состоянии. Если элемент или деталь слишком хрупкие, одно из решений состоит в том, чтобы добавить в конструкцию дополнительные распорки, чтобы повысить её жёсткость и обеспечить поддержку. Эти элементы крепления могут быть удалены после инфильтрации или спекания (когда деталь прочнее). Оптимальным решением является увеличение размеров этих элементов в соответствии с рекомендациями на рисунке 2.5. Тонкие элементы, прикрепленные к большим и тяжелым элементам, подвержены высокому риску поломки при обращении (рисунок 2.5, *а*). Эти области следует укрепить, добавив распорки (рисунок 2.5, *б*) или увеличив их размер (рисунок 2.5, *в*).

11 *Диаметр стержня (штифта)* – минимальный диаметральный размер стержня, который технология печати может обеспечить.

FDM: если дизайн содержит стержни диаметром менее 5 мм, добавьте небольшое скругление у основания стержня. Если функция имеет решающее значение, подумайте о том, чтобы включить в конструкцию отверстие в месте расположения штифта, просверлите отверстие до нужного размера и вставьте имеющийся в наличии штифт.

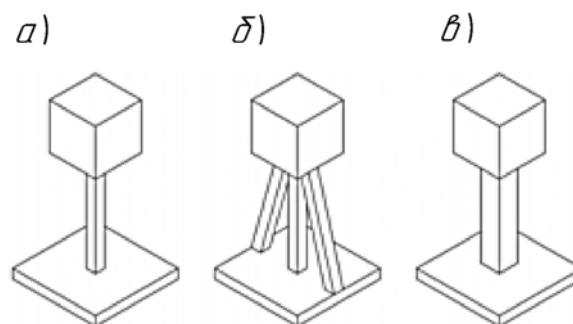


Рисунок 2.5 – Дизайн тонких элементов

12 *Соотношение сторон* – максимальное соотношение между высотой печати по вертикали и сечением детали в горизонтальной плоскости для обеспечения устойчивости напечатанной детали на рабочем столе. К высоким элементам можно добавить дополнительную устойчивость с помощью опорных ребер (аналогично литью под давлением).

13 *Галтели* характеризуются минимальным радиусом.

VJ: все скругления должны по возможности использоваться на всех краях модели. Это гарантирует, что они не будут повреждены в сыром состоянии. Галтели особенно важны для внутренних полостей, чтобы облегчить удаление порошка и обеспечить точность конструкции.

14 *Текст* характеризуется минимальной высотой шрифта для всех направлений.

SLS: рекомендуется шрифт без засечек.

15 *Ось* характеризуется минимальным зазором до поверхности подшипника или опоры.

SLS: нейлон как материал подшипника обеспечивает гладкую посадку с низким коэффициентом трения для соединений с низкой нагрузкой и низкой скоростью. Важно помнить, что порошок должен быть удален после процесса печати, чтобы обеспечить плавный ход соединения.

16 *Взаимосвязанные элементы (замковые элементы)* характеризуются размерной точностью соединения. Включение небольшого радиуса на краях деталей поможет при сборке соединений.

FDM: подходит для создания недорогих прототипов взаимосвязанных соединений, когда точность и долговечность не имеют критического значения.

SLS и MJ: лучше всего подходят для взаимосвязанных соединений благодаря их высокой точности печати и прочности материала.

17 *Резервуары* характеризуются минимальной толщиной стенки.

SLS: нейлон обладает хорошей химической стойкостью и часто применяется в нестандартных конструкциях резервуаров. Для дополнительной водонепроницаемости или при использовании агрессивных жидкостей, таких как топливо или растворители, ёмкость может иметь покрытие или облицовку. Избыток порошка должен быть удален изнутри бака.

SLA: если распечаток не предназначен для использования в качестве функциональной детали, наличие полости в модели значительно сокращает

количество необходимого материала и время печати. При печати полых деталей добавьте дренажные отверстия, чтобы предотвратить попадание незатвердевшей смолы внутрь готового распечатка. Неотвержденная смола создает дисбаланс давления внутри полых камер.

18 *Живой шарнир (интегрированный шарнир, подшипник изгиба)* характеризуется максимальной толщиной и минимальной длиной тела шарнира. Живой шарнир представляет собой тонкий гибкий шарнир, сделанный из того же материала, что и две жесткие части, которые он соединяет.

FDM: оптимальный дизайн для живого шарнира – это попытаться напечатать шарнир с помощью одной нити термопластика, интегрированной в жесткие секции сборки, как показано на рисунке 2.6. Некоторые FDM-принтеры с двойной экструзией предлагают возможность печатать секцию шарнира из вторичного гибкого материала (например, ТПУ), что еще больше улучшит производительность шарнира и количество циклов до отказа.

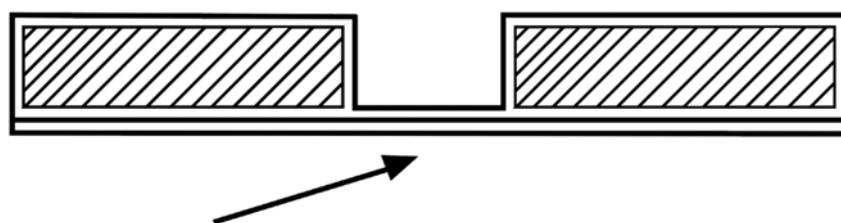


Рисунок 2.6 – Живой шарнир для FDM-печати

SLS: один из немногих методов 3D-печати, который позволяет создавать функциональные живые шарниры. Для получения шарнира отожгите модель путем нагревания (обычно достаточно погрузить её в кипящую воду), а затем согните шарнир вперед и назад.

MJ: обычно жесткие фотополимеры, используемые при струйной обработке материалов, являются хрупкими и не подходят для прототипов, где требуется более 10 циклов. Однако одним из основных преимуществ струйной печати материалов является возможность печати из нескольких материалов. Путем печати части шарнира из гибкого материала можно изготовить живую конструкцию шарнира, которая прослужит большое количество циклов.

19 *Толщина слоя* характеризуется высотой одного слоя при печати, которую обеспечивает технология. Влияние высоты слоя более заметно на кривых и углах и менее заметно на прямых вертикальных стенах из-за послойного характера 3D-печати. Например, чтобы напечатать отверстие вдоль горизонтальной оси, программное обеспечение должно разрезать круглое отверстие на несколько слоев, а затем наложить их друг на друга, создавая негладкий край, похожий на лестницу. Это называется ступенчатым эффектом и становится более заметным на поверхностях с большей кривизной (рисунок 2.7).

Если основной задачей печати является внешний вид, то идеальным вариантом будет выбор более низкой высоты слоя, так как это приведет к более гладкой поверхности. С другой стороны, при 3D-печати функциональной

детали предпочтительнее использовать более высокую высоту слоя, поскольку это приведет к экономии времени и средств, а также к улучшению механических характеристик.

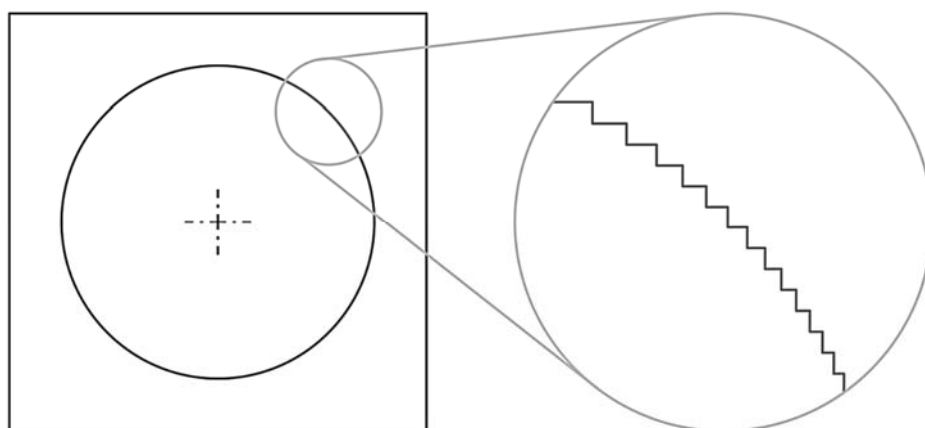


Рисунок 2.7 – Ступенчатый эффект

FDM: напечатанные детали из PLA с толщиной слоя 300 мкм, имеют прочность примерно на 20 % выше, чем детали, напечатанные толщиной 100 мкм.

20 Резьба характеризуется возможностью применения разных способов формирования резьбы. Способы формирования резьбы на деталях рассмотрены ниже.

Резьбовые вставки. Популярный метод, используемый регулярно, который обеспечивает прочное соединение металла с металлом, но требует дополнительных компонентов и установки. Два типа вставок лучше всего подходят для 3D-печати: термоусадочные вставки и врезные вставки.

Закладная гайка. Быстрый способ крепления компонентов. Нужен точный дизайн и печать. Часто для определения оптимальных размеров бобышки гайки требуется несколько итераций. Печать небольших тестовых деталей для определения идеальных размеров может сэкономить время и материальные затраты.

Саморезы. Один из способов крепления деталей, который не подходит для повторной разборки. Для пластика можно использовать специальные саморезы, которые ограничивают радиальное напряжение в отверстиях, напечатанных на 3D-принтере, снижая вероятность вздутия, расслоения или разрушения.

Нарезание резьбы. Нарезание резьбы дает свободу дизайна, однако важна правильная процедура нарезания резьбы.

Резьба на распечатке. Не подходит для небольших размеров резьбы (менее M5) и требует высокой детализации/разрешения принтера.

FDM: как правило, минимальная толщина стенки вокруг резьбы должна соответствовать диаметру крепежного элемента (например, для крепежного элемента M5 требуется минимальная толщина стенки 5 мм вокруг резьбового отверстия). Если толщина стенки слишком мала, детали могут вздуться и деформироваться из-за дополнительного напряжения, а в некоторых случаях может произойти расслоение или разрушение. Высота слоя – важный параметр

при печати резьбы. Ориентировочно, резьба больше M12 может быть успешно напечатана слоями толщиной 0,2 мм, а резьба меньшего размера должна быть напечатана более тонкими слоями.

SLS: шероховатая поверхность, полученная при печати, приводит к повышенному трению и может вызвать некоторые проблемы при соединении резьбовых деталей вместе. Можно сверлить и нарезать резьбу на нейлоне. Идеальным решением является использование нейлона только для одного из элементов резьбовых соединений (либо гайки, либо болта).

21 *Усадка* характеризуется процентным увеличением габаритных размеров модели на этапе предпечатного анализа. С учетом того, что это увеличение не повлияет на конструкцию детали.

SLA: вероятно для неподдерживаемых пролетов и выступов.

SLM, DMLS: технологии высоким риском усадки. Чтобы снизить вероятность этого, используются распорки и поддержки.

MJ: не является проблемой.

22 *Деформация* характеризуется склонностью к изменению формы и размеров под действием температурного воздействия и других факторов. Деформациями называются изменения размеров детали при сохранении её формы, а короблением – изменение формы детали (её может изогнуть, завернуть пропеллером и т. д.).

FDM: большие плоские области (например, характерные для прямоугольной коробки) более подвержены короблению, и их следует по возможности избегать. Тонкие выступающие элементы также склонны к короблению. Коробления можно избежать, добавив расходный материал на краю тонкого элемента, чтобы увеличить площадь, соприкасающуюся с платформой. Острые углы деформируются чаще, чем закругленные формы, поэтому добавление скруглений в дизайн является хорошей практикой. Различные материалы более подвержены деформации. ABS обычно более чувствителен к деформации, чем PLA или PETG.

SLA: одной из самых больших проблем, связанных с точностью деталей, изготовленных с помощью SLA, является скручивание (керлинг). Керлинг похож на деформацию в FDM. В процессе отверждения смола немного сжимается под воздействием источника света принтера. При значительной усадке между новым слоем и ранее затвердевшим материалом возникают большие внутренние напряжения, что приводит к скручиванию детали. Поддержка при печати важна когда нужно закрепить подверженные риску участки распечатка на рабочем столе и снизить вероятность скручивания. Ориентация деталей и ограничение больших плоских слоев также важны. Чрезмерное отверждение (например, подвергание детали воздействию прямых солнечных лучей после печати) также может вызвать скручивание. Лучший способ предотвратить скручивание – помнить об этом в процессе проектирования.

SLS: чтобы уменьшить вероятность коробления, которому подвержены большие плоские поверхности, рассмотрите возможность добавления ребер для увеличения жесткости. Оптимальная ориентация детали на этапе печати также может помочь.

SLM, DMLS: технологии высоким риском деформации. Чтобы снизить вероятность этого, используются распорки и поддержки.

MJ: не является проблемой.

23 *Многоцветность* характеризуется возможностью 3D-печати различными цветами в пределах одной детали или создания полноцветных презентационных прототипов.

MJ: высокий уровень точности, гладкая поверхность и варианты цвета делают струйную печать популярным выбором для презентаций и прототипов. Струйная обработка материалов – единственная технология 3D-печати, которая позволяет создавать полноцветные многоцветные распечатки. При использовании голубого, пурпурного, желтого, черного и белого материалов (СМУК) доступен полный набор цветовых вариантов. Этого можно добиться в процессе настройки печати, назначив частям цветовые коды RGB, или можно сделать в процессе САПР, раскрасив деталь. Текстурные слои также могут быть применены к детали. С помощью этого метода к частям можно добавить такие элементы, как мазки кисти, текстура древесины и градиентные цвета. Возможность многоцветной печати MJ означает, что эта технология позволяет создавать физические модели метода конечных элементов (МКЭ, FEA). Если анализ МКЭ выполняется на детали виртуально, полученный цветовой шаблон можно экспортировать в виде текстуры или слоя и распечатать непосредственно на детали, создавая видимый цветовой шаблон МКЭ на физическом образце для просмотра. Это дает инженерам и конструкторам уникальное представление о том, как деталь будет работать под нагрузкой.

24 *Мультиматериальная печать* характеризуется возможностью печати несколькими материалами в одном цикле.

MJ: некоторые принтеры способны печатать как резиновые, так и жесткие компоненты на одном столе, в одной и той же детали, а также в виде сборки для формирования новых свойств материала (мягкий резиноподобный материал и твердый жесткий материал можно смешивать для получения различных уровней жесткости резины). При проектировании для этого важно создавать сборки в САПР, чтобы разные детали можно было выбирать в качестве разных материалов во время подготовки к печати. При сопряжении этих собранных деталей в САПР не должно быть нахлеста тел. Следует использовать сопряжение с зазором «0 мм». Это позволит частям правильно стыковаться. Любые перекрывающиеся тела в модели САПР будут игнорироваться при печати, что приведет к заполнению области основным материалом сборки.

25 *Текстура* характеризуется возможностью получения глянцевой и матовой поверхности.

FDM: верхняя поверхность сглаживается экструзионным наконечником; поверхность, контактирующая с печатной платформой, обычно будет глянцевой, а поверхности над опорными конструкциями будут иметь следы поддержки.

SLA: нижние поверхности будут иметь метки поддержки и потребуют последующей обработки, а верхние поверхности будут гладкими и не будут иметь меток поддержки.

SLS, BJ: детали будут иметь более зернистую поверхность на нижней поверхности.

MJ: настройка матовости добавит тонкий слой поддержки по всей детали, независимо от ориентации или требований. Глянцевая настройка будет использовать вспомогательный материал только там, где это необходимо для построения модели (выступы, сквозняки, полости и т. д.). Преимущества печати с глянцевой текстурой заключаются в прочности на тонких стенах, эстетике гладкой и готовой детали и снижении расхода материала на сборку. К недостаткам можно отнести неравномерную отделку деталей и незначительное закругление острых кромок и углов на верхних поверхностях. Преимуществами печати с матовой текстурой являются точность детали в целом, а также однородность покрытия. Недостатки включают дополнительные требования к материалу, дополнительное время очистки и более мягкую поверхность. Эта более мягкая поверхность иногда может привести к слабости мелких или тонких элементов.

26 *Водонепроницаемость* характеризуется тем, при достижении каких значений гидростатического давления материал теряет способность не впитывать и не пропускать через себя воду.

SLA: объекты являются непрерывными, независимо от того, цельные они или имеют внутренние каналы. Водонепроницаемость важна в случаях, когда нужно контролировать и прогнозировать воздействие потоков воздуха или жидкости.

27 *Изотропность* характеризуется одинаковостью физических свойств во всех направлениях. Поскольку 3D-печать создает модели слой за слоем, прочность готовых деталей может отличаться в зависимости от ориентации детали относительно процесса печати: для осей X, Y и Z будут характерны различные свойства.

FDM: процесс анизотропный за счет подхода к созданию различных слоев в процессе изготовления. Эта анизотропия ограничивает возможности применения технологии или требует внесения дополнительных изменений в конструкцию модели для ее компенсации. Прочность связи между различными слоями всегда ниже базовой прочности материала: их прочность по оси Z всегда меньше, чем их прочность в плоскости XY. По этой причине важно учитывать ориентацию деталей при проектировании деталей для FDM. Влияния нагрузок при их различных направлениях представлены на рисунке 2.8.

SLA: достижение изотропии деталей основано на ряде факторов, которые можно строго контролировать за счет интеграции химического состава материалов с процессом печати. Во время печати компоненты полимеров образуют ковалентные связи, но при создании последующих слоев модель остается в «незрелом» состоянии частичной реакции. В незрелом состоянии смола сохраняет полимеризуемые группы, которые могут образовывать связи между слоями, придавая модели изотропические и водонепроницаемые свойства после окончательного отверждения. На молекулярном уровне между плоскостями X, Y и Z нет различий. Это позволяет получить модели с предсказуемыми механическими характеристиками, критически важными для таких целей, как

производство кондукторов и крепежных приспособлений и готовых деталей, а также функциональное прототипирование.

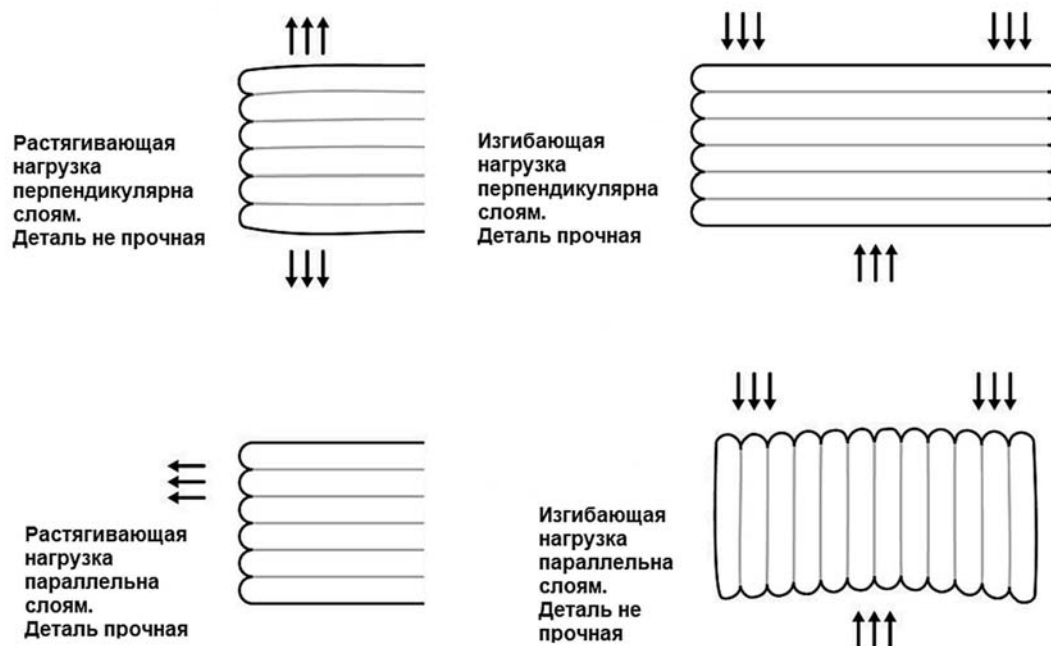


Рисунок 2.8 – Анизотропия FDM-печати

28 *Ориентация* характеризуется пространственным расположением модели при печати для получения поверхности с требуемым качеством.

29 *Размерная точность* – ожидаемая точность размеров и допусков конкретной технологии. Допуск детали в направлении печати составляет: \pm толщина одного слоя.

2.4 Порядок выполнения лабораторной работы

- 1 Получить чертеж или CAD-модель детали у преподавателя.
- 2 Проанализировать информацию о детали: размеры и допуски, сложность геометрии, материал, качество поверхности, функциональное назначение.
- 3 Проанализировать и составить цепочку подготовки модели к печати с учетом выбранного типа технологии аддитивного производства. Проанализировать возможную оптимизацию конструкции детали и условий печати на основании правил дизайна.
- 4 Оформить отчёт.

2.5 Содержание отчета

Отчёт по лабораторной работе выполняется на отдельных листах бумаги или в тетради. Он должен содержать следующее:

- название лабораторной работы;
- цель работы;

- анализ технологичности конструкции детали;
- технологическая цепочка подготовки модели к печати;
- предложения по оптимизации конструкции детали и условий печати на основании правил дизайна;
- ответы на контрольные вопросы;
- выводы.

Контрольные вопросы

1 Как и для каких целей производится оптимизация САД-модели? Какие при этом применяются инструменты проектирования?

2 Какие три основные стратегии построения трехмерных моделей деталей для 3D-печати Вы знаете?

3 Что такое решетчатые структуры?

4 Что такое оптимизация топологии?

5 Что такое порождающее моделирование (генеративный дизайн)?

6 Что такое правила дизайна для аддитивного производства? Зачем они необходимы конструктору?

7 Что такое поддержки? Какие основные правила дизайна поддержек для технологий аддитивного производства Вы знаете?

8 Какие способы формирования резьбы на деталях в условиях аддитивного производства Вы знаете?

9 Что такое изотропность? Как анизотропность 3D-распечатков влияет на дизайн деталей в условиях аддитивного производства?

10 Какую размерную точность обеспечивают технологии аддитивного производства?

3 Трехмерное сканирование и основы работы с 3D-сканером модели EinScan-Pro

Цель работы: освоение методики трехмерного сканирования деталей на основе метода структурированного света с использованием 3D-сканера модели EinScan-Pro.

3.1 Оборудование, инструменты и приборы

- 1 Объекты исследования: твердотельные детали.
- 2 3D-сканер модели EinScan-Pro, штатив, поворотный стол, текстурная камера, набор маркеров, калибровочная пластина.
- 3 Рабочая станция или ноутбук.
- 4 Программное обеспечение EinScan-Pro.
- 5 Программное обеспечение SolidWorks.

3.2 Сканирование структурированным светом

3D-сканер – периферийное устройство, анализирующее форму объекта и на основе полученных данных создающее его 3D-модель.

3D-сканеры делятся на два типа по методу сканирования.

1 Контактный.

Такой метод основывается на непосредственном контакте сканера с исследуемым объектом.

2 Бесконтактный.

2.1 Активные сканеры: излучают на объект некоторые направленные волны и обнаруживают его отражение для анализа: чаще всего используется светодиодный или лазерный луч, реже – рентгеновские лучи, инфракрасное излучение или ультразвук.

2.2 Пассивные сканеры: не излучают ничего на объект, а полагаются на обнаружение отражённого окружающего излучения. Большинство сканеров такого типа обнаруживает видимый свет – легкодоступное окружающее излучение.

Существует пять основных методов сбора данных при 3D-сканировании.

1 Фотограмметрия. Программное обеспечение объединяет множество фотографий объекта, сделанных с различных ракурсов, и определяет координаты с помощью триангуляции.

2 Лазер. Сканер излучает лазерный луч. Луч отражается от объекта и возвращается в датчик, который определяет расстояние до поверхности.

3 Координатно-измерительные машины (КИМ). КИМ используют шуп, который контактирует с поверхностью объекта.

4 Компьютерная томография. Метод неразрушающего послойного исследования строения предмета, основанный на измерении и сложной компьютерной обработке рентгеновского излучения проходящего сквозь объект.

5 Структурированный свет. Проектор излучает световые узоры (паттерны), которые деформируются при отражении от объекта. Затем одна или несколько камер распознают 3D-геометрию с помощью алгоритмов триангуляции, как показано на рисунке 3.1.

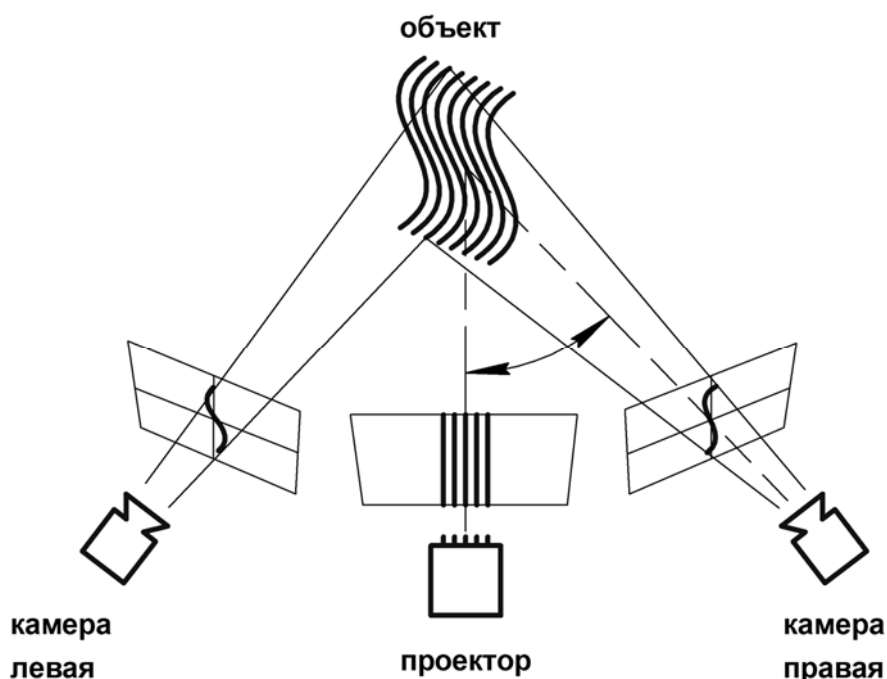


Рисунок 3.1 – Принцип сканирования структурированным светом

Процесс 3D-сканирования структурированным светом в общем случае представлен на рисунке 3.2 и состоит из следующих этапов:

- сканер собирает данные в виде точек, которые состоят из координат XYZ и, если есть такая опция, информацию о цвете (текстуре) и программное обеспечение 3D-сканера преобразует данные в облако точек;
- программное обеспечение 3D-сканера соединяет точки, создавая полигональную сетку;
- программное обеспечение CAD-проектирования преобразует файл полигональной сетки в файл твердотельной модели.

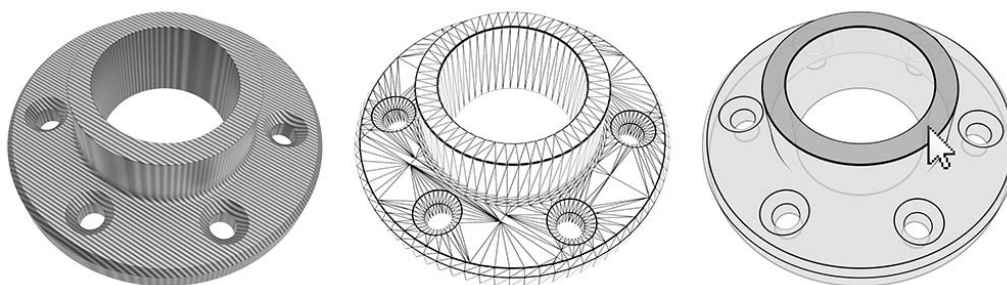


Рисунок 3.2 – Этапы 3D-сканирования

3.3 3D-сканер модели EinScan-Pro

Общий вид комплекта 3D-сканера модели EinScan-Pro представлен на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Комплект 3D-сканера EinScan-Pro

3D-сканер модели EinScan-Pro от компании SHINING 3D обладает следующим набором технических характеристик.

- 1 Режим работы: ручное HD-сканирование.
 - 1.1 Область сканирования: 0,03...4 м.
 - 1.2 Скорость сканирования: 15 кадров/с.
 - 1.3 Точность сканирования: 0,1 мм.
- 2 Режим работы: ручное быстрое сканирование.
 - 2.1 Область сканирования: 0,15...4 м.
 - 2.2 Скорость сканирования: 10 кадров/с.
 - 2.3 Точность сканирования: 0,3 мм.
- 3 Режим работы: автоматическое сканирование.
 - 3.1 Область сканирования: 0,03...0,15 м.
 - 3.2 Скорость сканирования: менее 2 с (один проход).
 - 3.3 Точность сканирования: 0,05 мм (один проход).
- 4 Режим работы: свободное сканирование.
 - 4.1 Область сканирования: 0,03...4 м.
 - 4.2 Скорость сканирования: менее 2 с (один проход).
 - 4.3 Точность сканирования: 0,05 мм (один проход).
- 5 Размер одного снимка: 210 × 150 мм.
- 6 Источник света: LED (белый).
- 7 Количество камер: 2 + 1 (две основные и одна камера для захвата текстур и цвета).
- 8 Поддерживаемые форматы: OBJ, STL, ASC, PLY, 3MF, P3.

9 Сканирование специальных объектов: для сканирования прозрачных, блестящих, темных объектов требуется применение специального спрея.

10 Дополнительное оборудование: калибровочная платформа, поворотный стол.

3.4 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Получить деталь у преподавателя.

2 Проанализировать конструкцию детали: размеры, сложность геометрии, текстуру, труднодоступные участки. Подготовить деталь к 3D-сканированию.

3 Выполнить калибровку 3D-сканера модели EinScan-Pro, выполняя пошаговые рекомендации программного обеспечения EinScan-Pro.

4 В программном обеспечении EinScan-Pro создать новый проект, определить параметры сканирования и выполнить 3D-сканирование детали. Сформировать итоговый файл.

5 Проанализировать полученные результаты.

6 Оформить отчёт.

3.5 Содержание отчета

Отчёт по лабораторной работе выполняется на отдельных листах бумаги или в тетради. Он должен содержать следующее:

- название лабораторной работы;
- цель работы;
- порядок калибровки 3D-сканера EinScan-Pro;
- анализ конструкции и порядок подготовки детали к 3D-сканированию;
- порядок 3D-сканирования детали и работа с программным обеспечением EinScan-Pro;
- ответы на контрольные вопросы;
- анализ полученных результатов и выводы.

Контрольные вопросы

1 Что такое 3D-сканер? Какие основные элементы его конструкции Вы знаете?

2 Как работают пассивные сканеры?

3 Какие основные методы сбора данных при 3D-сканировании Вы знаете? В чем их отличие?

4 На чем основан метод структурированного света?

5 Какие режимы сканирования 3D-сканера модели EinScan-Pro Вы знаете?

4 Изготовление деталей методом FDM-печати и основы работы на 3D-принтере

Цель работы: освоение методики 3D-печати на основе технологии FDM с использованием 3D-принтера.

4.1 Оборудование, инструменты и приборы

- 1 Объекты исследования: детали из термопластиков.
- 2 3D-принтер технологии FDM, набор филамента (ABS, PLA, PETG и др.), набор сопел.
- 3 Рабочая станция или ноутбук.
- 4 Программное обеспечение для слайсинга (Sli3er, Cura и др.).
- 5 Программное обеспечение для эмуляции 3D-печати (Repitier-Host и др.).
- 6 Программное обеспечение для 3D-моделирования (SolidWorks, Компас-3D и др.).

4.2 FDM-печать: процесс и оборудование

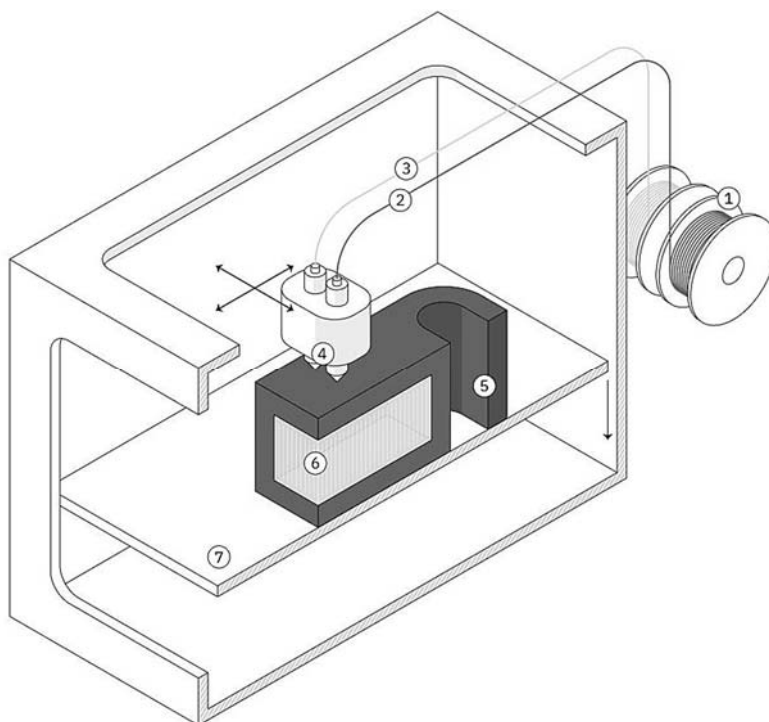
Моделирование методом послойного наплавления (FDM), также известное как изготовление методом плавления филамента (FFF), представляет собой процесс аддитивного производства, относящийся к категории экструзии материала. В FDM-печати объект создается путем выборочного нанесения расплавленного материала по заданному пути, слой за слоем, как показано на рисунке 4.1. Используемые материалы представляют собой термопластичные полимеры, которые выпускаются в форме нити (филамента).

Процесс FDM-печати заключается в том, что сначала в принтер загружается катушка термопластичной нити (филамента). Как только сопло достигает желаемой температуры, филамент подается в сопло через экструдер, где он плавится.

Экструдер прикреплен к трехосевой системе перемещения, которая позволяет рабочему органу перемещаться в осях X, Y и Z. Расплавленный материал подается тонкими полосками и укладывается слой за слоем в заранее определенных местах, где он охлаждается и затвердевает. Для ускорения охлаждения к экструдеру могут быть прикреплены кулеры (вентиляторы).

Для заполнения области построения требуется несколько проходов, аналогично закрашиванию прямоугольника маркером. Когда слой готов, платформа построения перемещается вниз (или в некоторых конфигурациях 3D-принтеров экструдер перемещается вверх) и наносится новый слой. Этот процесс повторяется до тех пор, пока деталь не будет завершена.

Большинство FDM-принтеров позволяют регулировать несколько параметров процесса. К ним относятся температура как сопла, так и платформы построения, скорость построения, высота слоя и скорость охлаждающего кулера.



1 – катушка филамента; 2 – главный филамент; 3 – филамент поддержек; 4 – экструдер; 5 – деталь; 6 – поддержки; 7 – платформа построения

Рисунок 4.1 – Принцип работы и конструкция FDM-принтера

Чтобы сократить время печати и сэкономить материал, детали при FDM-печати обычно не печатаются сплошными. Вместо этого внешний периметр, называемый оболочкой, трассируется с использованием нескольких проходов, а внутренний, называемый заполнением, заполняется внутренней структурой с низкой плотностью.

4.3 FDM-печать: материалы

Одной из сильных сторон FDM-печати является широкий спектр доступных для использования материалов, который включает в себя обычные термополимеры (такие как PLA и ABS), конструкционные материалы (такие как PA, TPU и PETG) и термополимеры с высокими эксплуатационными характеристиками (такие как PEEK и PEI).

Преимущества и недостатки материалов FDM-печати.

ABS:

- + хорошая прочность, стойкость к истиранию и термостойкость;
- + возможна постобработка парами ацетона для придания блеска;
- + постобработка: шлифование, полирование, покраска;
- + ацетон также можно использовать в качестве сильного клея;
- более подвержен деформации;
- чувствительный к ультрафиолетовому излучению;
- запах при печати и потенциально высокие выбросы дыма.

PLA:

- + отличное визуальное качество;
- + легко печатать детали из материала;
- + биоразлагаемый и отсутствие запаха;
- + постобработка: шлифование, полирование, покраска;
- + хорошая устойчивость к ультрафиолетовому излучению;
- низкая ударная вязкость;
- низкая влагостойкость;
- плохо склеивается.

Nylon (PA):

- + высокая прочность и износостойкость;
- + хорошая химическая стойкость;
- низкая влагостойкость;
- потенциально высокие выбросы дыма.

PETG:

- + безопасный для пищевых продуктов;
- + хорошая прочность и хорошая стойкость к истиранию;
- + легко печатать детали из материала;
- + высокая влагостойкость и химическая стойкость;
- + перерабатываемый;
- + постобработка: шлифование, полирование, покраска;
- тяжелее, чем PLA и ABS.

TPU:

- + очень гибкий;
- + хорошая стойкость к истиранию;
- + хорошая стойкость к маслам и жирам;
- затруднена постобработка;
- затруднена печать деталей с высокой точностью;
- плохо склеивается.

PEI:

- + отличная прочность по отношению к весу;
- + отличная огнестойкость и химическая стойкость;
- высокая стоимость.

PC:

- + возможно обеззараживание (стерилизация);
- + простота последующей обработки (шлифование);
- чувствительный к ультрафиолетовому излучению.

4.4 FDM-печать: постобработка

3D-печать FDM лучше всего подходит для экономичных прототипов, производимых в короткие сроки. Линии слоев обычно присутствуют на распечатках FDM, что делает постобработку необходимым этапом, если требуется гладкая поверхность детали. Некоторые методы постобработки также

могут повысить прочность распечатков, помогая уменьшить анизотропное поведение деталей FDM.

Основные методы постобработки после FDM-печати:

- удаление поддержки (support removal): стандартные и растворимые;
- шлифование (sanding) и полировка (polishing);
- холодная сварка (cold welding);
- заполнение пропусков (gap filling);
- грунтовка и покраска (priming and painting);
- сглаживание парами растворителя (vapor smoothing);
- погружение в растворитель (dipping);
- эпоксидное (epoxy coating) и металлическое покрытие (metal plating).

4.5 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Получить чертеж или CAD-модель детали у преподавателя.

2 Проанализировать информацию о детали: размеры и допуски, геометрию, материал, функциональное назначение, качество поверхности.

3 Выполнить оптимизацию конструкции детали – задать параметры печати и произвести операцию слайсинга – проверить управляющую программу в эмуляторе – при необходимости внести корректировки – загрузить управляющую программу в 3D-принтер – при необходимости заменить материал филамента – запустить печать – по окончании печати произвести анализ и дать рекомендации по постобработке детали.

4 Оформить отчёт.

4.6 Содержание отчета

Отчёт по лабораторной работе выполняется на отдельных листах бумаги или в тетради. Он должен содержать следующее:

- название и цель лабораторной работы;
- анализ конструкции и порядок подготовки детали к 3D-печати;
- порядок FDM-печати детали;
- рекомендации по постобработке детали после 3D-печати;
- ответы на контрольные вопросы;
- анализ полученных результатов и выводы.

Контрольные вопросы

1 Как работает принтер для FDM-печати?

2 Какие материалы применяются для FDM-печати?

3 Что такое филамент?

4 Какие основные методы постобработки деталей после FDM-печати Вы знаете?

5 Какие ограничения присущи 3D-печати по технологии FDM?

5 Изготовление металлических деталей методом SLM-печати и основы работы на 3D-принтере модели EP-M250

Цель работы: освоение методики 3D-печати на основе технологии SLM с использованием 3D-принтера модели EP-M250.

5.1 Оборудование, инструменты и приборы

- 1 Объекты исследования: детали из металлического порошка.
- 2 3D-принтер технологии SLM модели EP-M250, металлический порошок (316L и др.).
- 3 Рабочая станция или ноутбук.
- 4 Программное обеспечение для слайсинга (EPHatch и др.).
- 5 Программное обеспечение для 3D-моделирования (SolidWorks, Компас-3D и др.).

5.2 SLM-печать: процесс и оборудование

Селективное лазерное плавление (SLM) – это процесс аддитивного производства металлов, который относится к семейству 3D-печати методом сплавления в порошковом слое. Технология использует лазер для сканирования и выборочного плавления частиц металлического порошка, связывая их вместе и создавая деталь слой за слоем. Материалы, используемые в процессе, представляют собой металлы в гранулированной форме как показано на рисунке 5.1. SLM использует металлические порошки с одной температурой плавления и полностью расплавляет частицы. SLM-печать используется в промышленности для создания конечных инженерных продуктов.

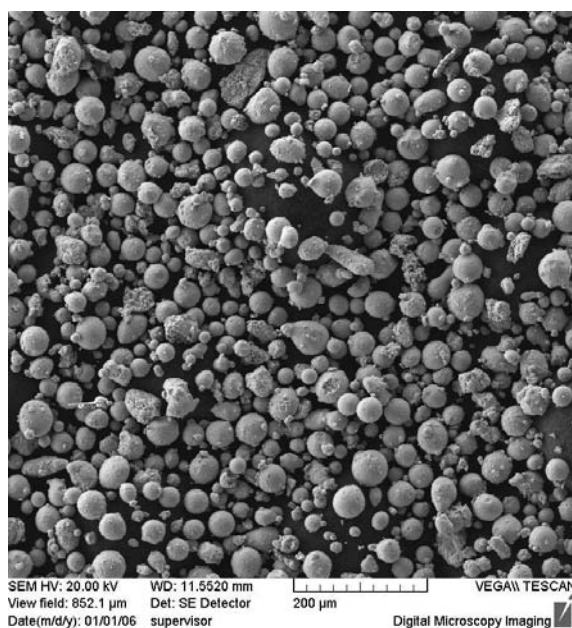
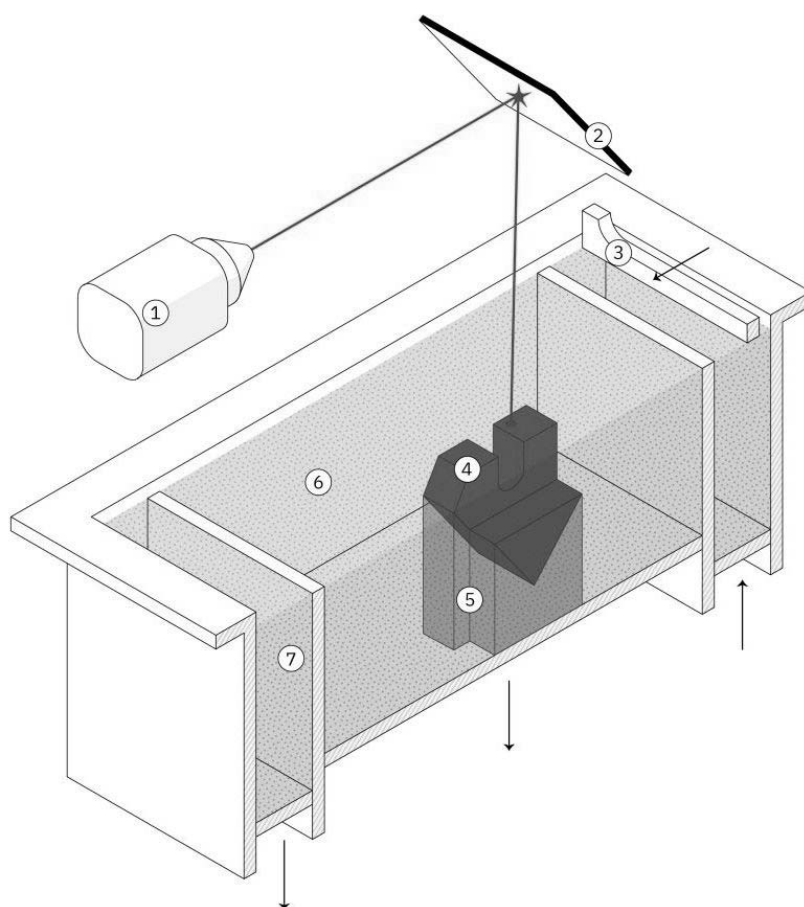


Рисунок 5.1 – Частицы металлического порошка для SLM-печати

В начале процесса подготовки печати на SLM-принтере (рисунок 5.2) камера сборки заполняется инертным газом (аргон, азот), чтобы свести к минимуму окисление металлического порошка, а затем нагревается до оптимальной температуры. Нагреву подлежит и платформа построения.



1 – лазер; 2 – система сканирующих зеркал; 3 – ракель (рекоутер); 4 – деталь; 5 – поддержки; 6 – металлический порошок; 7 – пересыпной бункер

Рисунок 5.2 – Принцип работы и конструкция SLM-принтера

Тонкий слой металлического порошка распределяется по платформе построения, и мощный лазер сканирует поперечное сечение компонента, расплавляя металлические частицы вместе и создавая следующий слой.

Когда процесс сканирования завершен, платформа построения перемещается вниз на один слой толщины, а ракель (рекоутер) наносит ещё один тонкий слой металлического порошка. Процесс повторяется до тех пор, пока печать не будет завершена.

Когда процесс печати закончен, детали полностью инкапсулируются в металлический порошок. В отличие от процесса сплавления полимерного порошкового слоя (например, SLS), детали прикрепляются к платформе сборки через опорные конструкции. Опора в 3D-печати металлом изготавливается из того же материала, что и деталь, и всегда необходима для уменьшения

воздействия деформаций, которые могут возникнуть из-за высоких температур обработки.

5.3 SLM-печать: материалы

SLM-печать позволяет производить детали из широкого спектра металлов и металлических сплавов, включая алюминий, нержавеющую сталь, титан, кобальт-хром и инконель. Эти материалы удовлетворяют потребности большинства промышленных применений, от аэрокосмической до медицины. Драгоценные металлы, такие как золото, платина, палладий и серебро, также могут быть обработаны, но их применение ограничено и в основном ограничивается изготовлением ювелирных изделий. Стоимость металлического порошка очень высока. По этой причине минимизация объема деталей и потребности в поддержках являются ключом к максимально возможному снижению стоимости. Ключевым преимуществом 3D-печати металлом является его совместимость с высокопрочными материалами, такими как никелевые или кобальт-хромовые суперсплавы, которые очень трудно обрабатывать традиционными методами производства.

Преимущества и недостатки материалов SLM-печати.

Алюминиевые сплавы:

- + хорошие механические и термические свойства;
- + низкая плотность;
- + хорошая электропроводность;
- низкая твёрдость.

Нержавеющая сталь и инструментальная сталь:

- + высокая износостойкость и твёрдость;
- + хорошая пластичность и свариваемость.

Титановые сплавы:

- + устойчивость к коррозии;
- + отличное соотношение прочности и веса;
- + низкое тепловое расширение;
- + биосовместимость.

Кобальт-хромовые суперсплавы:

- + отличная износостойкость и коррозионная стойкость;
- + отличные свойства при повышенных температурах;
- + очень высокая твердость;
- + биосовместимость.

Никелевые суперсплавы (инконель):

- + отличные механические свойства;
- + высокая коррозионная стойкость;
- + термостойкость до 1200 °С и применение в экстремальных условиях.

Драгоценные металлы:

- + использование в ювелирном деле.

5.4 SLM-печать: постобработка

Этап 3D-печати – это только начало производственного процесса изготовления деталей по технологии SLM. После завершения печати требуется несколько (обязательных или необязательных) этапов постобработки, прежде чем детали будут готовы к использованию. К обязательным этапам постобработки относятся:

- снятие внутренних напряжений: из-за очень высоких температур обработки во время печати возникают внутренние напряжения. Перед любой другой операцией их необходимо снять с помощью термической обработки;

- удаление деталей: при SLM-печати детали по существу привариваются к платформе построения. Здесь применяется резка на проволочном электроэрозионном станке, резка на ленточнопильном станке, резка на дисково-отрезном станке;

- удаление поддержки: поддержки в SLM всегда требуются для уменьшения коробления и деформаций, возникающих во время печати. Поддержки удаляются вручную или обрабатываются на станках с ЧПУ.

Для соответствия технической документацией часто требуются дополнительные этапы постобработки. К ним могут относиться:

- обработка на станках с ЧПУ: обработка используется в качестве чистового этапа когда требуются более жесткие допуски, чем стандарт $\pm 0,1$ мм. Для данного типа постобработки применяются минимальные припуски;

- термическая обработка: для улучшения свойств материала детали можно использовать термическую обработку или горячее изостатическое прессование (HIP);

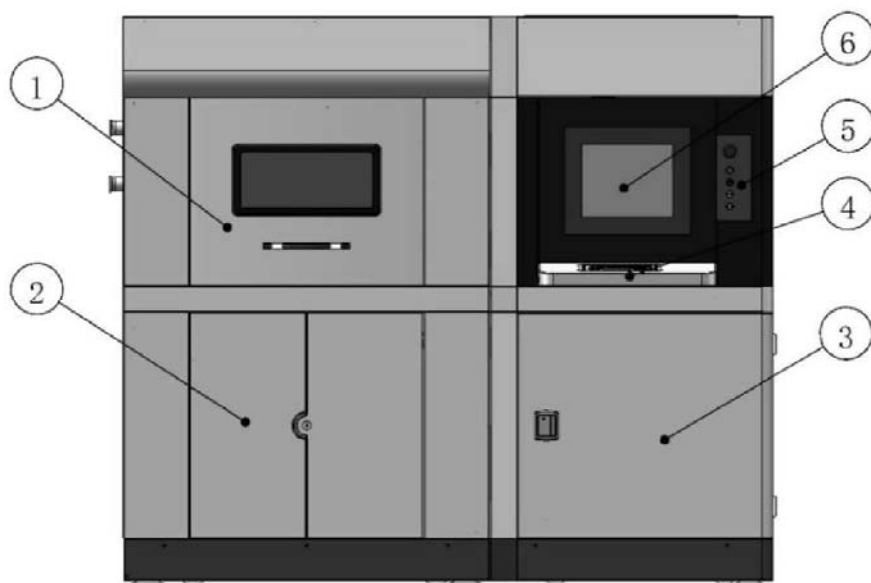
- сглаживание (полировка): для некоторых применений требуется более гладкая поверхность, чем стандартная шероховатость $Ra = 10$ мкм при SLM-печати. Обработку можно производить на универсальных станках и станках с ЧПУ, вибро- или химической полировкой, галтованием, пескоструйной обработкой и др.

5.5 3D-принтер технологии SLM-модели EP-M250: конструкция

EP-M250 – это промышленная установка для селективного лазерного плавления, выпущенная компанией E-Plus 3D (входит в концерн SHINING 3D). Машина плавит порошок слой за слоем с помощью высокоэнергетического лазера и формирует его в твердое металлическое тело на основе принципов послойного производства.

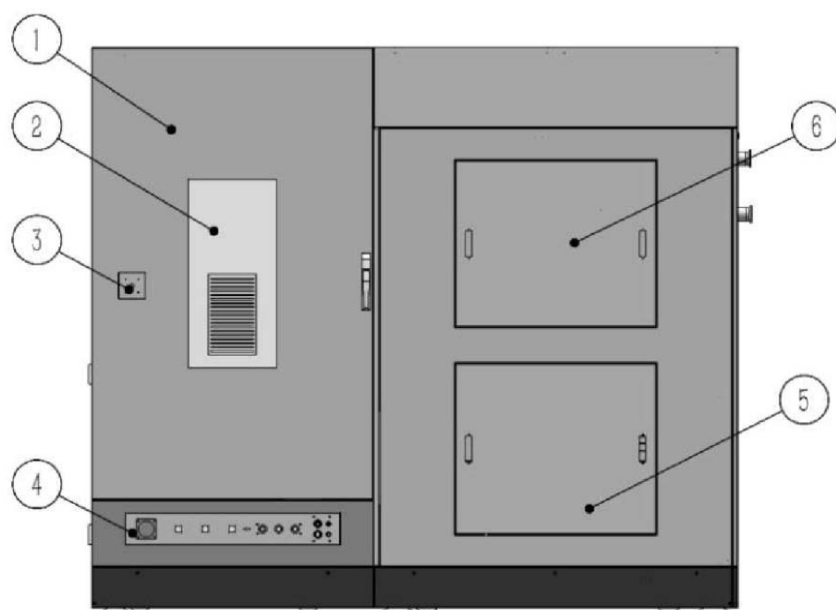
3D-принтер может использоваться для обработки промышленных изделий в таких областях, как аэрокосмическая промышленность, медицинские имплантаты, зубные протезы, пресс-формы, инструменты, детали специальной формы, ювелирные изделия и т. д. Комплекс EP-M250 также может использоваться в научных исследованиях и разработках, в образовании и в других отраслях.

Внешний вид 3D-принтера модели EP-M250 (установка подготовки газа не показана) представлен на рисунках 5.3–5.5.



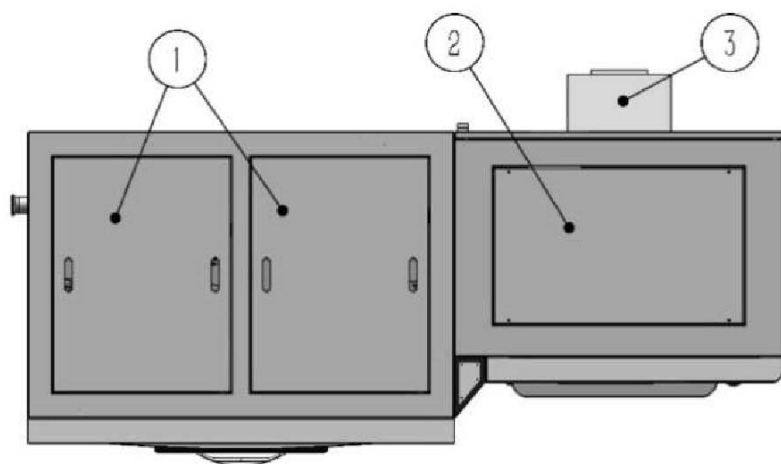
1 – передняя дверь верхней камеры; 2 – передняя дверь нижней камеры; 3 – передняя дверь электрического шкафа управления; 4 – операционная клавиатура; 5 – панель подключения управления; 6 – главный экран управления

Рисунок 5.3 – Внешний вид 3D-принтера модели EP-M250 (фронтальный вид)



1 – главная дверь электрического шкафа управления; 2 – кондиционер; 3 – главный выключатель питания; 4 – модуль электрического соединения; 5 – нижняя дверь главной машины; 6 – верхняя дверь главной машины

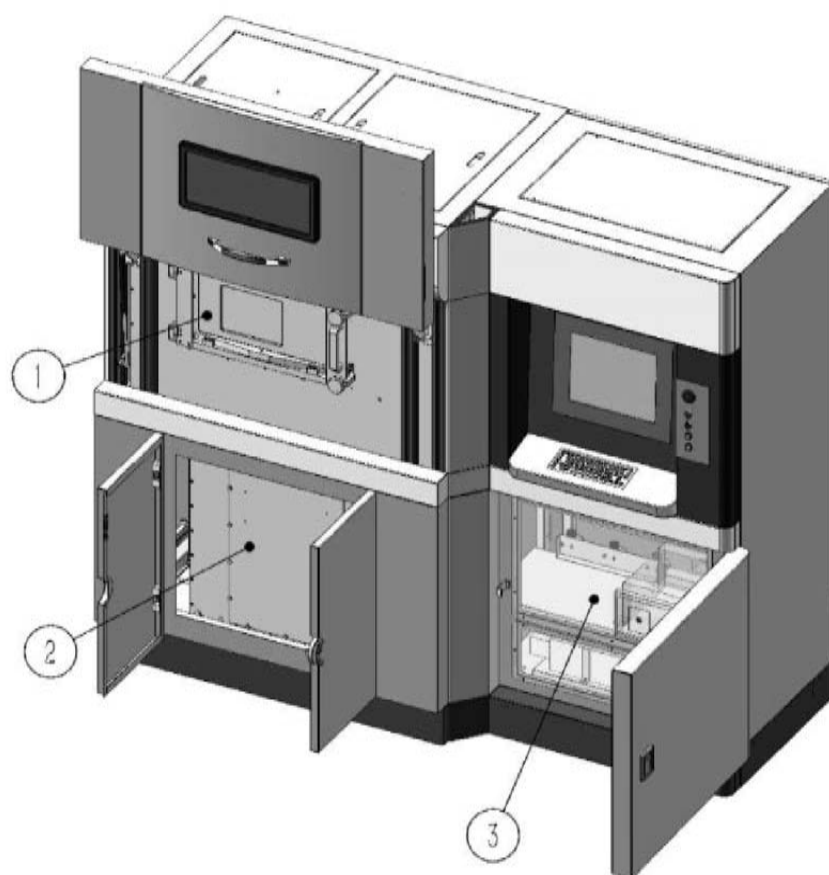
Рисунок 5.4 – Внешний вид 3D-принтера модели EP-M250 (задний вид)



1 – верхняя крышка; 2 – верхняя крышка электрического шкафа; 3 – кондиционер

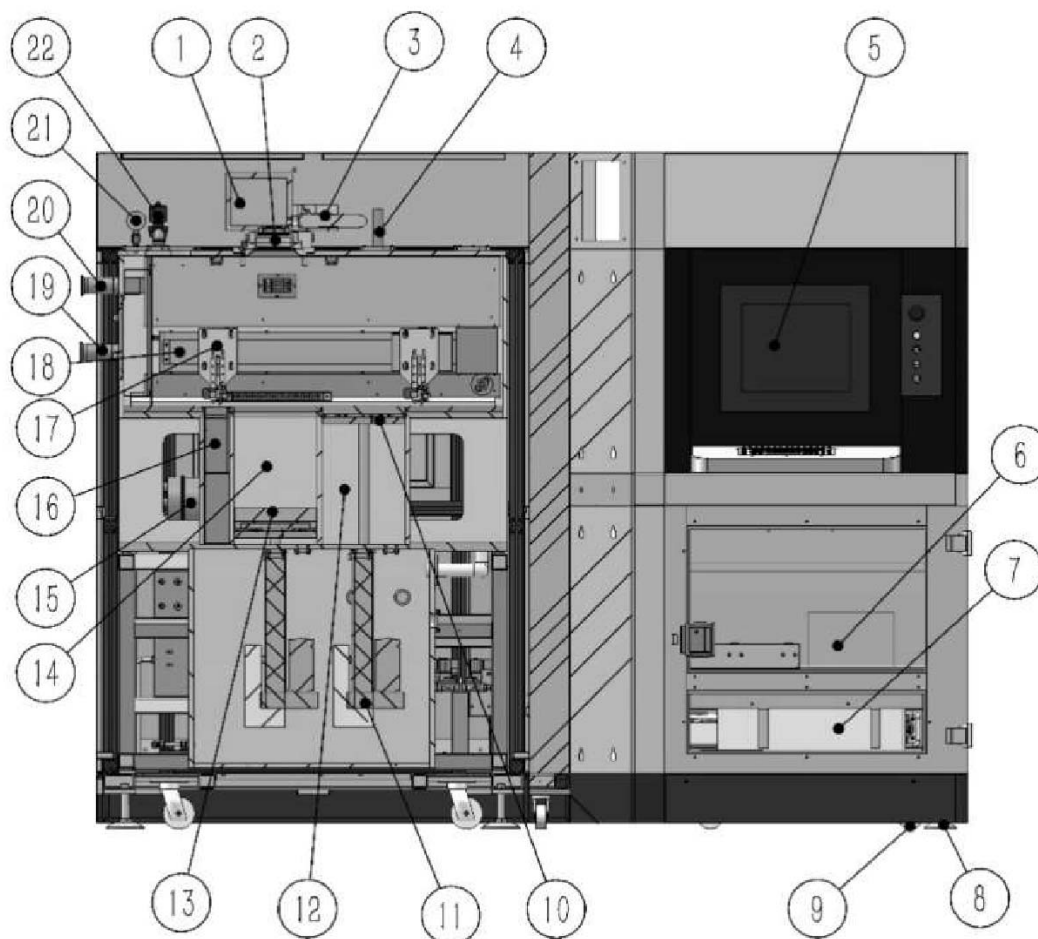
Рисунок 5.5 – Внешний вид 3D-принтера модели EP-M250 (вид сверху)

Основная внутренняя структура 3D-принтера показана на рисунках 5.6–5.8.



1 – внутренняя защитная дверь верхней камеры; 2 – внутренняя защитная дверь нижней камеры; 3 – промышленный компьютер и порт доступа к лазеру

Рисунок 5.6 – Внутренняя структура 3D-принтера модели EP-M250 (фронтальный вид)



1 – гальванометр; 2 – полевое зеркало; 3 – коллиматор (расширитель луча); 4 – датчик давления; 5 – экран; 6 – промышленный компьютер; 7 – оптоволоконный лазер; 8 – опора; 9 – ролик; 10 – поршень привода подачи материала; 11 – линейный привод подачи материала; 12 – цилиндр привода подачи; 13 – поршень платформы построения; 14 – формовочный цилиндр; 15 – блок фильтрации отработавших газов; 16 – бункер для порошка; 17 – рапель; 18 – линейный привод ракели; 19 – воздухозаборный канал; 20 – возвратный воздуховод; 21 – манометр; 22 – электромагнитный клапан выпускной камеры

Рисунок 5.7 – Внутренняя структура 3D-принтера модели EP-M250 (задний вид)

Функции каждого компонента структуры 3D-принтера следующие.

Гальванометр: основная функциональная часть лазерного сканирования, используемая для управления сканированием лазерного луча в эффективном поле зрения.

Коллимационный расширитель луча: изменение диаметра и угла расходимости луча, излучаемого лазером.

Полевое зеркало: фокусировка лазерного луча.

Датчик давления (манометр): определение давления в камере в режиме реального времени во время работы.

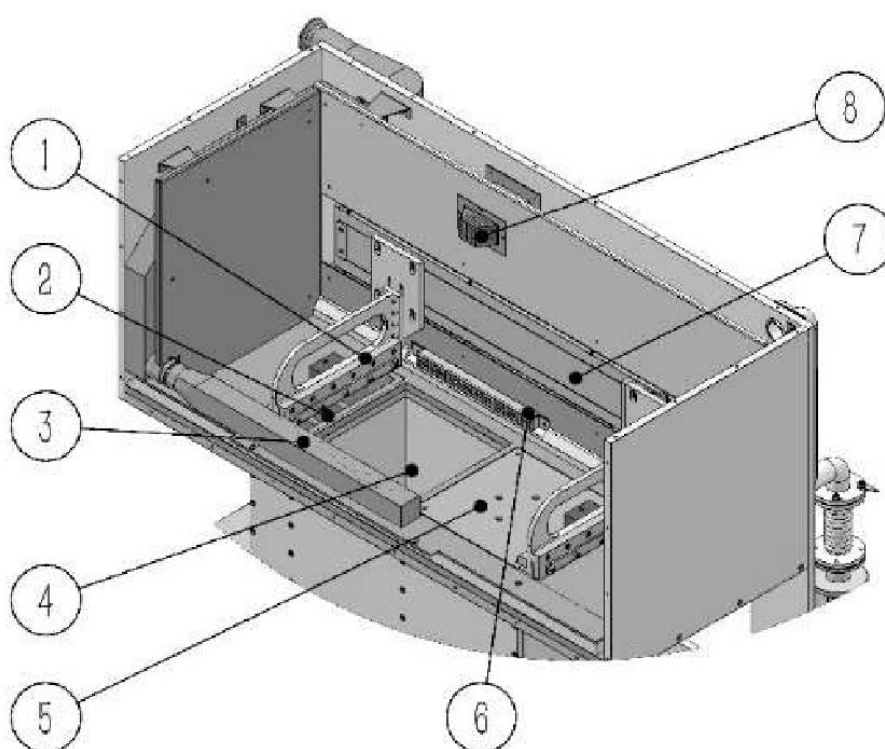
Блок фильтрации отработавших газов: фильтрация газов, выходящих из машины.

Линейный привод ракеля: приводит в движение систему для повторного нанесения покрытия от подающей платформы к платформе построения. Металлический порошок в подающей платформе равномерно распределяется по платформе построения вместе с движением ракеля.

Поршень привода подачи и платформы построения: носитель порошка и деталей.

Воздухозаборный канал и возвратный воздуховод: перенос пыли и пепла, образовавшегося в результате лазерного плавления порошка, в пылеуловитель и возврат отфильтрованного газа в технологическую камеру.

Электромагнитный клапан выпускной камеры: снижение избыточного давления, обеспечивающее поддержание давления в камере в определенном диапазоне.



1 – ракель; 2 – пересыпной канал бункера; 3 – всасывающий патрубок; 4 – платформа построения; 5 – подающая платформа (фидер); 6 – нижний выход инертного газа; 7 – линейный привод ракеля; 8 – верхний выход инертного газа

Рисунок 5.8 – Принципиальная схема формовочной камеры

5.6 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Получить чертеж или CAD-модель детали у преподавателя.

2 Проанализировать информацию о детали: размеры и допуски, геометрию, материал, функциональное назначение, качество поверхности.

3 Выполнить оптимизацию конструкции детали – задать параметры печати и произвести операцию слайсинга – загрузить управляющую программу в 3D-принтер – проверить управляющую программу в эмуляторе – при необхо-

димости внести корректировки – запустить печать – по окончании печати произвести анализ и дать рекомендации по постобработке детали.

4 Оформить отчёт.

5.7 Содержание отчета

Отчёт по лабораторной работе выполняется на отдельных листах бумаги или в тетради. Он должен содержать следующее:

- название и цель лабораторной работы;
- анализ конструкции и порядок подготовки детали к 3D-печати;
- порядок SLM-печати детали;
- рекомендации по постобработке детали после 3D-печати;
- ответы на контрольные вопросы;
- анализ полученных результатов и выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Как работает принтер для SLM-печати?
- 2 Какие материалы применяются для SLM-печати?
- 3 Какие технические газы применяются для SLM-печати?
- 4 Какие существуют методы постобработки деталей после SLM-печати?
- 5 Какие ограничения присущи 3D-печати по технологии SLM?
- 6 Какие основные элементы внешней конструкции 3D-принтера модели EP-M250 Вы знаете?
- 7 Какие основные элементы внутренней структуры 3D-принтера модели EP-M250 Вы знаете?
- 8 Какое функциональное назначение каждого из основных элементов структуры 3D-принтера модели EP-M250?
- 9 Что такое рапель, материал и назначение?
- 10 Какой тип лазерного источника установлен в 3D-принтере модели EP-M250?

Список литературы

1 **Calderaro, D. R.** Selection of additive manufacturing technologies in productive systems : a decision support model / D. R. Calderaro, D. P. Lacerda, D. R. Veit // Gestao & Producao. – 2020. – № 3. – P. 1–45.

2 Knowledge base. Design guidelines. Hubs [Electronic resource]. – 2022. – Made of access: <https://www.hubs.com/knowledge-base/design-guidelines/>. – Date of access: 10.01.2022.

3 **Зленко М. А.** Аддитивные технологии в машиностроении : учебное пособие / М. А. Зленко, А. А. Попович, И. Н. Мутылина. – Санкт-Петербург : Политехн. ун-т, 2013. – 200 с.