

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Машины и технология литейного производства»

А. О. Дикун
С. Л. Ровин

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности
6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование
и производство материалов и изделий из них»
профилизации «Аддитивные технологии в литейном производстве»

В 2 частях

Часть 1

ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ
ТВЕРДЫМИ ПОЛИМЕРАМИ
И ФОТОПОЛИМЕРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию
в области металлургического оборудования и технологий*

Минск
БНТУ
2025

УДК 621.7:004

ББК 32.81

A28

Р е ц е н з е н т ы:

декан факультета «Повышения квалификации и переподготовки»
ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ», кандидат технических наук, доцент *В. А. Стасюлевич*;
начальник литейной лаборатории ОАО «МТЗ»,
кандидат технических наук *С. А. Куликов*

Дикун, А. О

A28 Аддитивные технологии в литейном производстве: учебно-методическое пособие для студентов специальности 6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование и производство материалов и изделий из них» профилизации «Аддитивные технологии в литейном производстве : в 2 ч. / А. О. Дикун, С. Л. Ровин. – Минск : БНТУ, 2025. – Ч. 1 : Технологии трехмерной печати твердыми полимерами и фотополимерными материалами. – 54 с.
ISBN 978-985-31-0081-5 (Ч. 1)

Учебно-методическое пособие разработано в соответствии с учебной программой по дисциплине «Аддитивные технологии и прототипирование в литейном производстве», содержит требования и необходимую информацию для выполнения практических работ по указанной дисциплине.

Издание предназначено для закрепления теоретических знаний, полученных при изучении дисциплины, а также приобретения практических навыков, необходимых для овладения выбранной дисциплиной.

УДК 621.7:004

ББК 32.81

ISBN 978-985-31-0081-5 (Ч. 1)

ISBN 978-985-31-0080-8

© Дикун, А. О., Ровин, С. Л., 2025

© Белорусский национальный
технический университет, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Практическая работа № 1. ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ РЕАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	5
Практическая работа № 2. ИЗУЧЕНИЕ FFF/FDM-ТЕХНОЛОГИЙ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ FFF/FDM-ОБОРУДОВАНИЯ. УПРАВЛЯЮЩИЙ G-КОД FFF 3D-ПРИНТЕРА.....	11
Практическая работа № 3. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ И РЕЖИМЫ ПЕЧАТИ ИЗДЕЛИЙ ПО FFF/FDM-ТЕХНОЛОГИИ.....	21
Практическая работа № 4. ПОСТОБРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ПОСЛЕ FFF/FDM-ПЕЧАТИ.....	30
Практическая работа № 5. ДЕФЕКТЫ ТРЕХМЕРНОЙ FFF/FDM-ПЕЧАТИ, СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ.....	36
Практическая работа № 6. ФОТОПОЛИМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ. SLA-, DLP-, LCD-ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТИ	46
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	54

ВВЕДЕНИЕ

Целью изучения дисциплины «Аддитивные технологии и прототипирование в литейном производстве» является ознакомление студентов с технологиями прототипирования и аддитивного производства изделий, историей их появления и развития, технологическим оборудованием и материалами, применяемыми при аддитивном производстве изделий в рамках литейного производства, основами организации аддитивного производства, ознакомление с профессиональной терминологией.

Основными задачами учебной дисциплины являются:

- ознакомление студентов с важнейшими технологическими процессами изготовления изделий методом трехмерной печати, включая процессы получения материалов, применяемых в аддитивном производстве, физико-химические процессы, протекающие внутри материала изделия при последовательном его формировании, процессы формирования и финишной обработки готовых изделий;
- ознакомление с современным технологическим оборудованием, применяемым в технологическом цикле аддитивного производства, на различных стадиях прототипирования;
- изучение основных материалов, применяемых в аддитивном производстве изделий;
- обучение студентов квалифицированному пользованию современными пакетами программного обеспечения автоматизированного написания и кодировки управляющей программы 3D-принтера;
- обучение студентов навыкам финишной доработки изделий, полученных методом 3D-печати;
- обучение студентов навыкам предварительной обработки виртуальных 3D-моделей, полученных методом трехмерного сканирования.

Практическая работа № 1

ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ РЕАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Цель работы: ознакомление с современными технологиями трехмерного сканирования; изучение устройства и принципа работы применяемого оборудования; получение практических навыков работы с профильным технологическим оборудованием.

Приборы и материалы: макеты отливок, фотограмметрическое оборудование (поворотный стол, фотограмметрический сканер, источники постоянного света – 3 шт.), лазерный и оптический трехмерные сканеры, компьютер с программным обеспечением для обработки полученных сканов, набор маркеров-наклеек, проектор и подставка для него, тканевый хромакей.

Общие сведения

Трехмерное сканирование – это процесс преобразования геометрии реального объекта в цифровое облако точек с последующим созданием виртуальной трехмерной модели сканируемого объекта, осуществляемого при помощи специализированного оборудования – 3D-сканера.

При помощи трехмерного сканера производится создание цифрового оттиска, полностью повторяющего геометрию реального объекта.

Технологии трехмерного сканирования значительно облегчают процесс прототипирования (создания прототипов различной направленности) и незаменимы при реверс-инжиниринге, т. е. при воссоздании технологии или доработке конструкции уже созданного ранее изделия, для которого отсутствует документация по его изготовлению.

На сегодняшний момент существует несколько основных технологий трехмерного сканирования, применимых в литейном производстве, а именно оптическое, лазерное и фотограмметрическое сканирование реальных объектов.

Современные трехмерные сканеры представляют собой высокотехнологичные устройства, основным назначением которых яв-

ляется создание трехмерных моделей различного рода физических объектов. Сканеры, применяемые в литейном производстве, в зависимости от технологии сканирования разделяются на два типа: лазерные и оптические. Сканирующие устройства, работающие по технологии фотограмметрии, относятся к оптическим сканерам.

Технология оптического трехмерного сканирования заключается в следующем: сперва сканируемый объект обклеивается специальными маркерами (рис. 1.1), которые позволяют ПО сканера правильно совмещать различные поверхности объекта в формирующемся облаке точек при сканировании объекта с разных сторон. После чего объект помещается под проектор, который засвечивает сканируемую область монохромным рисунком, в качестве которого может выступать как шахматная сетка, так и полосы и любые другие рисунки, содержащие геометрические фигуры правильной формы (круг, квадрат, треугольник и т. д.). Проектор, осуществляющий засветку объекта, может быть как встроен в сканер, так и вынесен отдельно.

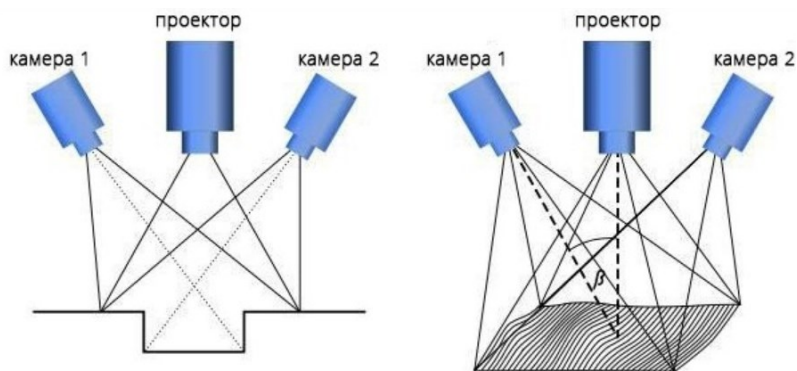


Рис. 1.1. Принципиальная схема оптического сканирования

После засветки модели монохромным рисунком чувствительные сенсоры оптического сканера анализируют деформации монохромного рисунка, вызванные перепадом высот объекта, и передают их в микроконтроллер сканера, который анализирует полученные от сенсоров данные, на основании которых производится построение облака точек и формирование полигональной поверхности виртуальной 3D-модели посредством вычислительных мощностей ЭВМ.

Все лазерные трехмерные сканеры работают по принципу триангуляции (рис. 1.2), однако способ фиксации данных лазерного луча и соответственно алгоритм расчетов зависит от производителя и модели сканирующего устройства. На данный момент наиболее широкое распространение получили 4 метода определения кривизны поверхности сканируемого объекта.

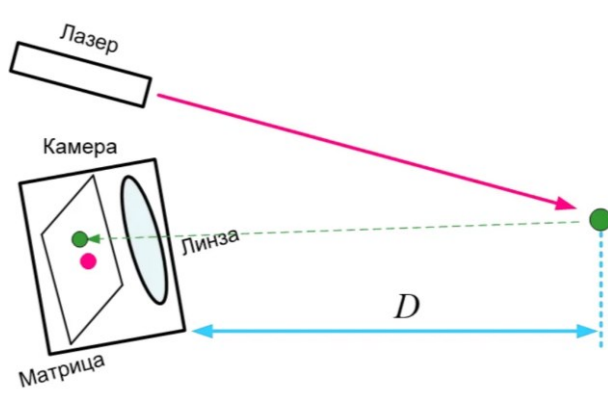


Рис. 1.2. Принципиальная схема лазерного сканирования

В качестве измеряемого параметра при лазерном триангуляционном сканировании могут выступать следующие величины: время, за которое лазерный луч отражается от поверхности объекта и попадает на светочувствительную матрицу (импульсный метод), измерение отклонения координаты лазерного пятна на светочувствительной матрице с последующим вычислением угла отражения (угловой метод), измерение отклонения фазы световой волны от заданных значений при эталонном расстоянии (фазовый метод), измерение отклонения диаметра пятна лазерного луча от заданного при эталонном расстоянии (диаметральный метод).

При лазерном сканировании применяются специальные маркеры (рис. 1.3), которыми обклеиваются изделия, что необходимо для ориентации лазерного сканера в пространстве.

При лазерном сканировании цвет лазерного луча зависит от цвета сканируемой поверхности и подбирается так, чтобы лазерный луч имел наибольший контраст по сравнению со сканируемой поверхностью.

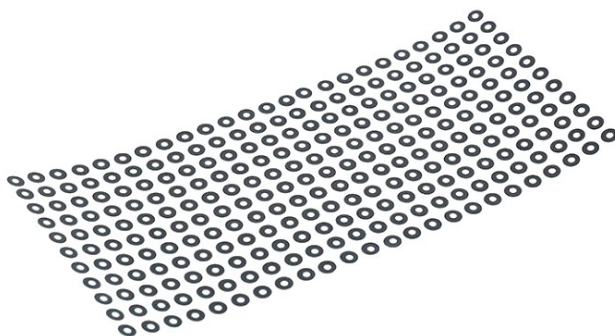


Рис. 1.3. Наклейки-маркеры

Технология фотограмметрического трехмерного сканирования (рис. 1.4) применяется при невозможности или затруднениях применения вышеописанных технологий, например, при наличии глянцевых, отражающих или полупрозрачных поверхностей.



Рис. 1.4. Фотограмметрический сканер

При фотограмметрическом сканировании весь процесс сводится к нанесению специальных кодовых маркеров на объект сканирования и последующему фотографированию объекта с различных углов.

После фотографирования специальная программа соединяет полученные фотографии воедино по нанесенным ранее маркерам, после чего происходит создание облака точек и формирование виртуальной модели.

Главным отличием данной технологии от описанных ранее является не только возможность работать с отражающими, бликующими и полупрозрачными объектами, но и наличие возможности работы с фотографиями, сделанными на любое устройство. Также технологию фотограмметрии можно успешно совмещать с другими технологиями сканирования тех мест сканируемых объектов, которые затруднительно сканировать вышеописанными технологиями.

Порядок выполнения работы

Установить проектор на штатив, подключить оптический сканер к компьютеру и запустить нужное программное обеспечение. Подготовить сканируемый объект путем нанесения на него маркеров. Осуществить сканирование первого объекта при помощи оптического сканера, переворачивая объект после полного сканирования каждой из сторон объекта, далее посредством ПО удалить все лишние элементы, после чего сохранить полученное облако точек.

Подготовить второй сканируемый объект путем наклеивания на него маркеров со всех его сторон. Подключить к ЭВМ и откалибровать лазерный сканер. После чего осуществить сканирование подготовленного ранее объекта. После сканирования удалить все лишние элементы и сохранить полученное облако точек.

Подготовить третий сканируемый объект путем нанесения на него специальных маркеров. Установить на штатив фотограмметрический сканер и подключить его к ЭВМ. Разместить сканируемый объект на поворотный стол, покрытый тканевым хромакеем. Включить поворотный стол и запустить процесс сканирования с указанием параметров удаления с фотографий цвета хромакея. Обработать и сохранить полученное облако точек.

Отключить и сложить оборудование на свои места, отклеить наклейки-маркеры со сканируемых объектов и утилизировать наклейки. Разложить на места модели для сканирования.

Провести сравнительный анализ трех виртуальных моделей, полученных при помощи трех различных технологий. Сделать выводы и оформить отчет о проделанной работе.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Методика проведения работы.
5. Результаты работы.
6. Ответы на контрольные вопросы.
7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют методы трехмерного сканирования?
2. Для чего предназначены наклейки маркеры?
3. Опишите принцип работы оптического сканера.
4. Опишите принцип работы лазерного сканера.
5. Опишите технологию фотограмметрического сканирования.
6. Назовите преимущества фотограмметрической технологии.
7. Для чего нужен поворотный стол при фотограмметрическом сканировании?
8. Перечислите основные технологии лазерного сканирования.

Практическая работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ FFF/FMD-ТЕХНОЛОГИЙ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ FFF/FDM-ОБОРУДОВАНИЯ. УПРАВЛЯЮЩИЙ G-КОД FFF 3D-ПРИНТЕРА

Цель работы: ознакомление с FFF/FDM-технологиями трехмерной печати; изучение устройства и принципа работы применяемого FFF- и FDM-оборудования; обзор управляющего ПО и разбор управляющего G-кода.

Приборы и материалы: трехмерный FFF-принтер, трехмерный FDM-принтер, управляющее ПО принтера, ЭВМ, полимер для печати.

Общие сведения

Аббревиатура FFF (Free Form Fabrication) – в переводе с английского: «производство свободного формообразования».

Аббревиатура FDM (Fusion Deposition Modeling) – в переводе с английского: «моделирование методом наплавления».

Обе эти технологии являются схожими между собой как по принципу работы оборудования, так и по конструкции 3D-принтеров. Однако между ними есть несколько серьезных различий.

Технология FDM-печати была разработана в 1989 году. Суть технологии заключается в прохождении полимерной нити через разогретое сопло на горячую поверхность построения, при этом все основные узлы FDM-принтера находятся в закрытой подогреваемой камере. Таким образом, полимерный материал выходит из горячей среды, проходит горячую камеру и поступает на горячую поверхность, а в конце печати камера плавно остывает.

В свою очередь, при FFF-печати так же, как в случае с FDM, полимерная нить проходит через горячее сопло, однако, в отличие от FDM-технологии, при FFF-печати камера искусственно не подогревается или вовсе отсутствует, а дальше материал так же, как и в случае с FDM-технологией, попадает на поверхность построения, которая, в отличие от технологии FDM-печати, может быть как подогреваемая, так и холодная (это зависит

от адгезивных свойств применяемого полимера). Таким образом, при FFF-печати материал из горячего сопла проходит через холодную среду и попадает на теплую или холодную поверхность построения.

Помимо того, что при FFF-печати камера является холодной или вовсе отсутствует, применяется система принудительного воздушного охлаждения зоны нанесения полимера для его скорейшего отверждения (это способствует формированию более четкой геометрии печатаемых изделий).

Рассмотрим конструкцию FFF/FDM-принтера на примере конструкции FFF-принтера (рис. 2.1).

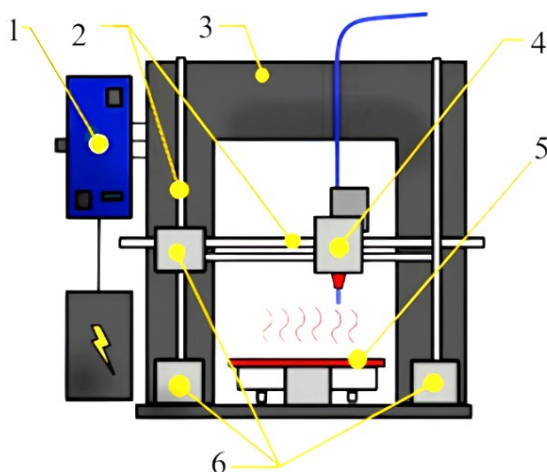


Рис. 2.1. Компоновочная схема FFF-принтера:

1 – блок электронного управления; 2 – направляющие; 3 – корпус;
4 – печатающая головка; 5 – подогреваемый стол; 6 – шаговые двигатели

Трехмерный FFF-принтер состоит из: блока электронного управления 1, в нем расположена управляющая плата с драйверами шаговых двигателей и блок питания принтера; направляющих 2, обеспечивающих перемещение печатающей головки 4 строго вдоль заданных координат; корпуса 3, на котором смонтированы все основные узлы и агрегаты 3D-принтера; печатающей головки 4, осуществляющей плавление и подачу полимера в зону печати, а также на ней смонтирована система принудительного воздушного охлаждения

зоны печати; подогреваемого стола 5, который является поверхностью построения 3D-принтера. Стол принтера имеет функцию подогрева для улучшения адгезии полимера и предотвращения самопроизвольного отлипания изделия во время печати.

Печатающая головка представляет собой набор различных систем, смонтированных на одной корпусной платформе (рис. 2.2).

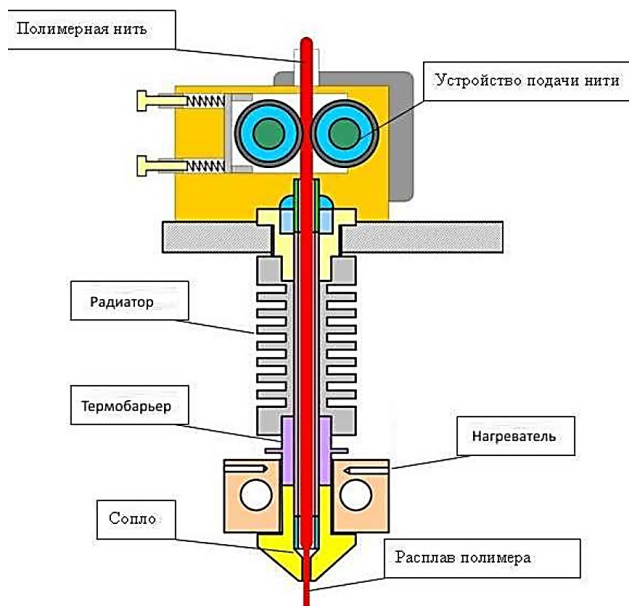


Рис. 2.2. Компоновочная схема экструдера печатающей головки

Основными элементами печатающей головки являются: устройство для подачи нити, как правило, представляет собой две шестерни к одной, из которых подключен привод в виде шагового двигателя (однако встречаются и другие варианты его исполнения); радиатор, способствующий снижению температуры холодной зоны, что необходимо для правильной экструзии полимера, так как экструзия нагретого полимера осуществляется твердой частью полимерной нити, расположенной над зоной плавления (рис. 2.3); термобарьер, служащий для создания резкого градиента температур между горячей и холодной зонами экструдера (хотенда) (рис. 2.3); нагревательный блок, состоящий из корпуса, опоясывающего сопло и термобарьер, патронного

нагревателя, вставляемого в специальное отверстие нагревательного блока, а также термистера, служащего для контроля температуры сопла (устанавливается в технологическое отверстие нагревательного блока и контактами выводится в блок электронного управления); сопло с отверстием определенной формы и размера, как правило, диаметром 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 мм, необходимое для правильного формообразования в процессе печати. Также внутри сопла есть небольшая камера, в которой и осуществляется плавление полимерной нити.



Рис. 2.3. Температурная схема экструдера (хотенда)

Помимо систем подачи и нагрева материала, печатающая головка снабжается системами принудительного охлаждения как самого хотенда, так и зоны печати. Как видно из схемы распределения температуры (рис. 2.3), хотенд имеет горячую (нагревательный блок и сопло) и холодную (системы обдува, подачи и направления материала) зоны. Наибольшая температура удерживается в зоне плавления, и чем выше от зоны плавления, тем больше должно быть обеспечено снижение температуры. Это необходимо для поддержания нормальных режимов работы оборудования.

Управление рабочими органами принтера осуществляется не только через интерфейс самого принтера, но также через ЭВМ посредством кабеля или же систем беспроводной передачи данных, включая интернет.

Все команды рабочим органам 3D-принтера поступают в виде отдельных кадров G-кода. Само название «G-код» для управляющего кода связано с особенностями кодирования команд. Так как «кадры», при помощи которых кодируются конкретные действия рабочих органов (включение/выключение двигателей, нагревательных элементов, регулирование скорости работы кулеров и т. д.) записываются в текстовой форме и кадры, кодирующие основные действия начинаются с буквы латинского алфавита «G» (G95, G00, G18 и т. д.).

Программное обеспечение для 3D-печати (рис. 2.4) подразумевает не только автоматическую печать или ручное управление органами 3D-принтера посредством нажатия соответствующих активных кнопок интерфейса, но и ручной ввод кадров управляющего G-кода как в отдельности, так и целыми фрагментами.

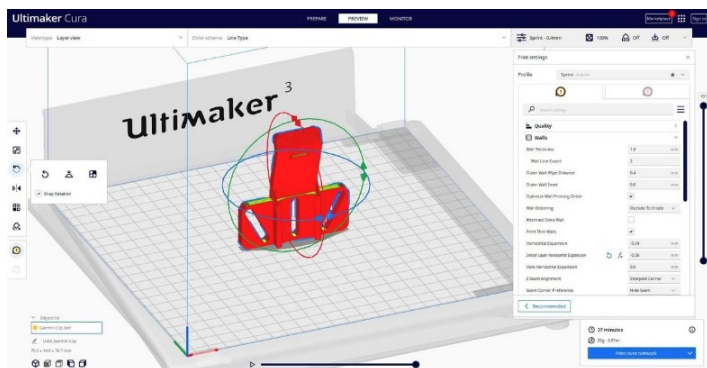


Рис. 2.4. Общий вид интерфейса управляющего ПО

G-код для 3D-принтера является более простой и модифицированной версией управляющего кода для станков с ЧПУ.

Управляющий G-код разбивается на отдельные команды – кадры. Каждый кадр состоит из буквы и цифры (M18, G92, F28 и т. д.) и отвечает за конкретное действие рабочих органов принтера.

Расшифровка большей части кадров управляющего кода FFF/FDM-принтера приводится в табл. 2.1.

Ручной ввод кадров управляющего G-кода требуется для более точной настройки оборудования или для выявления неисправностей в его работе. Также ручной ввод необходим для оптимизации и управления G-кода, написанного автоматическими алгоритмами.

Таблица 2.1

Обозначение, расшифровка и описание
некоторых кадров управляющего G-кода

Кадр	Расшифровка	Примечание
1	2	3
G0	Холостой ход (XX)	Быстрое перемещение без нанесения материала
G1	Рабочий ход (PX)	Медленное перемещение с нанесением материала
E (число)	Модификатор экструзии	Количество выдавливаемого материала в мм (E12), при отрицательных значениях происходит втягивание (E-12)
F (число)	Модификатор скорости перемещения	Устанавливает скорость перемещения в мм/мин до следующего кадра такого же типа. Применяется вместе с кадром G0, либо с G1
X (число), Y (число), Z (число)	Координаты	Задаёт значение координаты для перемещения в мм
G4	Ожидание	Задаёт величину паузы. Применяется только вместе с модификаторами S и P
P (число)	Модификатор для кадра G4	Применяется только совместно с G4. Необходим для указания времени в миллисекундах (пример G4 P1300)
S (число)	Модификатор для кадра G4	Применяется только совместно с G4. Служит для указания времени паузы в секундах (пример G4 S2)
G10	Ретракт материала в соответствии с настройкой M207	Запуск последовательности команд по отводу и повторной подаче материала по алгоритму команды M207
G11	Регулировка подачи	Осуществляет регулирование подачи материала в соответствии с алгоритмом команды M208
G20	Смена системы измерения	Устанавливает дюймовую систему измерений до следующей подобной команды
G21	Смена системы измерения	Устанавливает метрическую систему измерений до следующей подобной команды
G28	Перемещение «домой»	Возврат инструмента в нулевую позицию (X0, Y0, Z0)
G29	Создание сетки кривизны стола	Команда позволяет задать динамическую кривизну поверхности построения. Отменяется командой G28

Продолжение табл. 2.1

1	2	3
S0	Модификатор G29	Начало создания сетки
S1	Модификатор G29	Установка первичной точки сетки
S2	Модификатор G29	Сохранение значения и переход к новой точке
G90	Смена режима координат	Установка абсолютных координат, которые считаются от начала координат принтера
G91	Смена режима координат	Устанавливает относительные координаты. За точку отсчета принимается текущее положение инструмента
G92	Установить нулевую координату	Может применяться как без модификаторов (сброс координат), так и с указанием параметров X, Y, Z, E
M17	Включение привода	Подача питания на шаговые двигатели принтера
M18	Отключение привода	Убрать подачу напряжения с двигателей принтера
M20	Список файлов SD карты	Вывести информацию на дисплей о файлах на вставленной SD карте
M21	Инициализация SD карты	Применяется если при установке SD карты, она не прочиталась
M22	Извлечение SD карты	Аналог безопасного извлечения SD карты на Windows
M23	Выбор файла	Выбор файла на SD карте
M24	Запуск печати	Начать/продолжить печать
M25	Пауза печати	Приостановить печать
M28	Запись	Начать запись последовательности введенных команд в файл filename.gcod на SD карте
M30	Удаление	Удалить файл с SD карты
M32	Запуск печати	Выбрать файл и запустить печать одновременно (M23+M24)
M80	Включить блок питания	Вывод из спящего режима
M81	Выключить блок питания	Ввод принтера в спящий режим
M82	Смена режима экструзии	Абсолютный отсчет длины экструзии
M83	Смена режима экструзии	Относительный отсчет длины экструзии
M84	Перевод приводов в режим ожидания	M84 S(число) X, Y, Z, E
M92	Смена числа шагов	Установка числа шагов шагового двигателя необходимых для перемещения на 1 мм. Применяется с модификаторами X, Y, Z, E

Продолжение табл. 2.1

1	2	3
M104	Установить температуру экструдера	Задать температуру экструдера без режима ожидания до конца нагрева. Применяется с модификатором S и числом в градусах: M104 S215
M105	Сведения о температуре	Выводит значения температуры принтера.
M106	Обдув зоны печати	Включает кулер охлаждения и устанавливает его скорость (0–255), где $127 \approx 50\%$ мощности кулера
M107	Выключить обдув	Отключение обдува зоны печати
M108	Отключить нагрев	Отменяет ожидание нагрева от команд M109 и M190 и позволяет продолжить печать
M109	Температура экструдера с ожиданием	Нагрев экструдера до заданных параметров и ожидание его нагрева до заданной температуры. M109 S(число в секундах)
M110	Запуск строки с номером	Запускает кусок кода с номером строки, указанным после N. Пример: M110 N132
M112	Стоп	Экстренная остановка
M114	Позиция	Вывод текущих координат
M115	Прошивка	Вывод версии прошивки
M119	Статус концевиков	Вывод состояния концевиков
M140	Нагрев стола	Установить нагрев стола без ожидания его нагрева до указанной температуры. Пример: M140 S65 (нагрев до 65 градусов)
M190	Нагрев стола с ожиданием	Тоже что и M140 только с паузой до конца нагрева
M200	Указать диаметр прутка	Устанавливает диаметр прутка. Пример: M200 D1.65 T1 (диаметр 1.6 мм для экструдера № 1)
M201	Значение ускорений	Задаёт максимальные значения ускорений для печати в мм/с^2 . Применяется с модификаторами X, Y, Z, E
M203	Значения скорости	Задаёт максимальные значения скорости в мм/с по аналогии с M201
M204	Установка ускорений	Задаёт текущие ускорения по аналогии с M201
M205	Скорость рывков	Задаёт скорость рывков в мм/с по аналогии с M201
M206	Установка смещений	Устанавливает смещения относительно концевиков. Применяется вместе с модификаторами X, Y, Z

1	2	3
M207	Параметры ретракта	Устанавливает параметры ретракта. S (длина ретракта), F (скорость ретракта), Z (подъем по оси Z). M207 S1 F500 Z1
M208	Восстановление подачи	Возвращение к нормальной подаче после ретракта. Модификаторы S и F по аналогии с M 207
M500	Сохранение данных	Отвечает за перманентное сохранение введенных настроек. В память EEPROM
M501	Чтение данных	Чтение данных из EEPROM памяти
M600	Смена филамента	Автоматическая замена материала

Порядок выполнения работы

Подробно изучить устройство 3D-принтера, проверить конструктивную целостность 3D-принтера и наличие смазки на осях координат, а также обязательно убедиться в отсутствии преград на пути движения рабочих органов 3D-принтера.

Изучить интерфейс встроенного в принтер дисплея, задать в ручном режиме принтеру команду перемещения в нулевую координату (дом).

Запустить управляющую программу принтера на ЭВМ. Выбрать из библиотеки необходимую модель принтера, ввести его параметры (при необходимости). Подключить принтер к ЭВМ посредством кабеля и осуществить несколько перемещений вдоль осей координат встроенным в ПО функционалом ручного управления. Нагреть сопло до температуры печати полимера (указана на катушке с самим полимером) и осуществить замену материала. Включить и отрегулировать систему охлаждения зоны печати.

Внимательно изучить и законспектировать таблицу кодовых обозначений команд G-кода (табл. 2.1).

На листке бумаги написать G-код для принтера в соответствии с выданным индивидуальным заданием. После проверки преподавателем отсутствия критических ошибок ввести написанный G-код в соответствующую строку в ПО и отдать команду на его исполнение принтером. Пронаблюдать за ходом исполнения G-кода, записать свои наблюдения в отчет.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Таблица расшифровки G-кода.
5. Написанный в соответствии с индивидуальным заданием фрагмент G-кода.
6. Описание поведения 3D-принтера после ввода в него написанного фрагмента G-кода.
7. Ответы на контрольные вопросы.
8. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные отличия технологии FFF от FDM.
2. Из каких основных узлов состоит FFF/FDM 3D-принтер?
3. Опишите основные системы, смонтированные на печатающей головке 3D-принтера.
4. Опишите технологию FFF/FDM-печати.
5. Опишите технологию фотограмметрического сканирования.
6. Опишите принцип подачи материала в FFF/FDM-принтере.
7. Как распределяются температуры внутри хотенда?
8. Раскройте ряд понятий: хотенд, позиция дома, ретракт, рывок, филамент поверхность построения.
9. Для чего существует возможность подогрева поверхности построения?

Практическая работа № 3

ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ И РЕЖИМЫ ПЕЧАТИ ИЗДЕЛИЙ ПО FFF/FDM-ТЕХНОЛОГИИ

Цель работы: получение навыков печати по FFF/FDM-технологиям; изучение базовых подготовительных операций и основных настроек, влияющих на процесс выращивания изделий из твердых полимеров.

Приборы и материалы: FFF 3D-принтер, источник бесперебойного питания, управляющее ПО принтера, ЭВМ, полимер для печати, набор инструментов для мелкой работы, пинцет, кусачки, канцелярский нож, коврик для резки, ручной гравер и набор сменных насадок к ней, наждачная бумага, сахар, кисточка, растворитель, система местной вентиляции, электроплитка, лабораторная посуда, комплект СИЗ (очки, респиратор, плотные защитные перчатки).

Общие сведения

Перед тем, как начать печать на принтере, следует провести ряд подготовительных операций. Одной из таких операций является нанесение специального адгезивного покрытия на поверхность построения. Это необходимо для усиления адгезии между выращиваемой моделью и поверхностью построения, так как в случае недостаточной адгезии существует высокий риск частичного или полного отрыва модели от поверхности построения.

В качестве адгезивных материалов применяют специализированные клеящие составы или различные липкие вещества. Однако, несмотря на широкое распространение специализированных клеящих составов, одним из наиболее доступных и эффективных средств для повышения адгезии до сих пор является обыкновенный сахар.

Для правильного нанесения адгезивного покрытия из кристаллического сахара его сперва необходимо разбавить в воде, для этого необходимо разогреть воду до 50–60°, это необходимо для повышения растворимости сахара. После чего сахар необходимо смешивать с водой до тех пор, пока он не прекратит в ней растворяться. Далее при помощи кисточки наносится насыщенный

водный раствор сахара на поверхность построения. После нанесения раствора производится нагрев поверхности построения до полного ее высыхания. Данное покрытие на основе сахара наносится в 2–3 слоя.

Хорошие адгезивные свойства такого покрытия обусловлены низкой температурой размягчения и плавления сахара. В результате прохождения разогретого сопла на небольшом расстоянии от поверхности с покрытием из сахара происходит расплавление сахара и его спекание с нанесенным на него расплавленным полимером. При отдалении нагретого сопла сахар снова густеет и частично кристаллизуется, что обеспечивает надежную фиксацию модели в процессе печати. Для снятия модели со стола в конце печати достаточно отключить нагрев стола, на котором происходит формирование модели, в результате чего сахар окончательно кристаллизуется, при этом происходит снижение вязкости и адгезивных свойств, а в добавок твердая кристаллическая фаза сахара является достаточно хрупкой и ее верхний слой откалывается при съеме моделей. Также покрытие из сахара обладает легким самовосстанавливающимся эффектом, при повторном нагреве такое покрытие снова приобретает определенную текучесть, заполняя мелкие трещины и небольшие пустые пространства.

Следующей операцией подготовительного процесса является калибровка стола 3D-принтера. Это необходимо для создания правильного первого слоя при печати модели. При калибровке стола принтера измеряется зазор между крайней точкой сопла при нулевой координате Z и поверхностью построения 3D-принтера. Нормальным считается зазор равный 0,1 мм по всей поверхности построения, что примерно равняется толщине стандартного листа A4, при этом допускаются небольшие отклонения в пределах 0,02 мм от указанной величины зазора. В случае большой кривизны поверхности существует возможность создания программируемой сетки высот поверхности построения с использованием команды G29 управляющего G-кода. Однако данная функция поддерживается не всеми моделями 3D-принтеров.

Процесс калибровки стола 3D-принтера в ручном режиме имеет определенные особенности, зависящие непосредственно от системы кинематики 3D-принтера и его системы координат.

Рассмотрим принцип калибровки стола 3D-принтера, имеющего классическую декартову систему координат. В случае ручной калибровки и данной системы координат калибровка стола осуществляется при помощи специальных винтов (рис. 3.1), расположенных под столом 3D-принтера в каждом из 4-х его углов.



Рис. 3.1. Общий вид винта, регулирующего зазор в процессе калибровки

Калибровка стола 3D-принтера осуществляется в 5 положениях сопла, а именно по всем 4-м углам, отступая от края стола примерно по 1–2 см и в центре. Перед началом движения рабочих органов 3D-принтера необходимо применить команду «Дом» для получения принтером нулевых координат. Далее следует поднять сопло по высоте оси Z на 0,1 мм (при использовании листа бумаги) или на любое другое расстояние, совпадающее с толщиной применяемого щупа, но не более 1 мм. После поднятия сопла на нужную высоту, необходимо переместить сопло в один из 4-х углов калибруемого стола, при этом расстояние от края стола по двум координатам должно составлять не менее 1–2 см. Далее производится настройка зазора при помощи соответствующего винта (рис. 3.1) и проверка зазора щупом или же листком бумаги. Щуп или лист бумаги должен легко, но без люфта, перемещаться в зазоре, в случае с листком бумаги сопло должно слегка царапать лист при свободном перемещении. После настройки одного из 4-х винтов следует повторить про-

цедуру на оставшихся 3-х винтах, двигаясь при этом последовательно от угла к углу, рекомендуется перемещаться по часовой стрелке. По окончании выставления зазора на углах производится замер зазора в центре стола.

В случае перепада высот от центра стола к краям более чем на 0,05 мм, так называемой выпуклости или вогнутости поверхности построения, рекомендуется при калибровке стола по углам отходить от краев стола более чем на 1–2 см, осуществляя таким образом калибровку только центральной части области печати или же создавать программируемую сетку кривизны стола.

Однако существуют конструкции 3D-принтеров, подразумевающие функцию автоматической калибровки стола посредством датчика уровня (автоуровень) (рис. 3.2). В случае применения такого датчика допускаются значительные перепады высоты поверхности построения (вплоть до 0,5 мм).

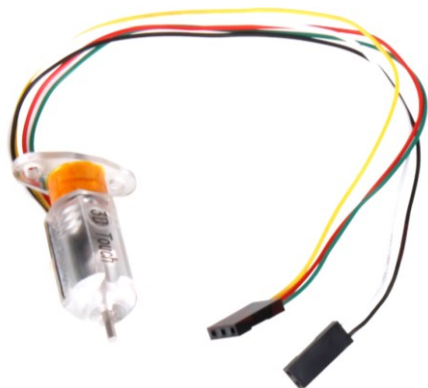


Рис. 3.2. Общий вид датчика автоуровня

Под режимами печати подразумеваются совокупности параметров управляющей программы 3D-принтера, при помощи которых осуществляется контроль над процессом выращивания моделей. На данный момент существует чуть более 300 настраиваемых параметров при печати по технологии FFF/FDM. Наиболее важной из них является относительно небольшая группа настроек, оказывающих значительное влияние на качество, массу и время печати получаемых изделий.

Первой не только по списку, но и по значимости является высота слоя модели, именно она кардинально влияет не только на качество, но и на скорость печати. Как правило, при FFF/FDM-печати используется определенный ряд конкретных высот: 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 (при использовании сопла Ø 0,4 мм) и 0,6; 0,8; 1; 1,4 (при использовании сопла отличного от Ø 0,4 мм в большую сторону). Наиболее популярными являются 0,1; 0,25; 0,3 для точной, нормальной точности и грубой печати соответственно.

Чем больше высота слоя, тем хуже точность получаемых моделей и выше скорость печати.

Следующим параметром, влияющим на точность поверхности и ее износостойкость, является толщина стенок модели. Чем выше толщина стенок, тем выше износостойкость получаемых таким образом модельных комплектов. Однако качество поверхности значительно зависит от толщин стенок только при значениях от 0,1 до 2 мм, дальнейшее увеличение толщин стенок не приводит к повышению качества наружной поверхности изделий. Данный параметр оказывает влияние на массу изделия и время печати. Следует заметить, что толщина стенок должна быть кратна диаметру сопла, в противном случае геометрия модели не будет соответствовать требуемой.

Еще одним из важнейших параметров печати является процент заполнения, он напрямую влияет на массу, время печати и общую прочность моделей. В большинстве случаев модель после печати является полой и для повышения ее прочности в процессе написания программы закладывается алгоритм, осуществляющий заполнение полости изделия объемной сеткой, имеющей определенный рисунок. Чем выше процент заполнения, тем более массивной и монолитной будет структура модели. При печати литейных моделей рекомендуется закладывать 40 % заполнения изделий. Данный процент заполнения обеспечивает достаточную для литейного производства прочность литейных моделей и является оптимальным с точки зрения времени печати и веса получаемых изделий.

Параметры температуры также являются одними из важнейших параметров трехмерной печати. Для каждого типа материала существуют свои рекомендованные температурные параметры как сопла, так и поверхности построения. Как правило, они указываются производителем непосредственно на упаковке материала и имеют вид температурных диапазонов. Указанные производителем температу-

ры выбираются исходя из требуемой степени текучести материала и скорости его затвердевания. В случае повышенных скоростей печати и при наличии мощного обдува зоны печати рекомендуется использовать верхний предел указанного производителем диапазона температур. Превышать рекомендованные производителем значения более чем на 10–15° крайне не рекомендуется по причине его возможного обугливания или даже горения, что приведет не только к закупорке просвета сопла, но и будет способствовать появлению или усилению (в случае применения ABS-полимера) выделения вредных для человека веществ.

Ключевым параметром, влияющим на время печати изделий, является скорость перемещения рабочих органов принтера. На данный момент большинство FFF/FDM-принтеров работает на скоростях 60–120 мм/с при рабочем перемещении, однако существует ряд конструкций принтеров, обеспечивающих рабочее перемещение вплоть до 600–800 мм/с, а холостой ход при этом может осуществляться на скоростях вплоть до 1 500 мм/с.

Такое ограничение скорости рабочих перемещений обусловлено жесткостью кинематики принтера, мощностью охлаждения зоны построения модели, свойствами применяемых материалов и максимальным количеством обрабатываемых операций управляющей платой принтера в единицу времени. Построение модели можно вести и при скоростях холостого хода, однако в таком случае вырабатываемая модель будет получаться крайне низкого качества или же вовсе модель не будет формироваться.

Существуют также настройки рывков и ускорений, они необходимы для обрыва тянущихся за соплом тонких паутин из твердеющего полимера. Данные тонкие нити из полимера оказывают влияние на точность и качество изделий, а также увеличивают количество операций и общую продолжительность постобработки выращенных моделей. Помимо рывков и ускорений для борьбы с вытягиваниями горячего полимера применяются так называемые ретракты, они имеют целый ряд настроек и отвечают за втягивание материала внутрь сопла перед быстрым перемещением от одной области нанесения полимера до другой с последующим выдавливанием материала до прежнего значения координаты «Е» (экструзии).

Настройки охлаждения зоны печати необходимы для детального контроля за характером отверждения полимера во время его печати. Рекомендуется полное отключение охлаждения при печати первого (обеспечивающего адгезию) слоя и последующее прибавление мощности с каждым новым слоем до значений, требуемых тому или иному материалу.

При печати сложных моделей существует необходимость качественной печати нависающих над поверхностью построения структур. Для этих целей существуют специальные поддерживающие структуры (поддержки), они печатаются вместе с моделью и являются опорами для нависающих структур. Поддержки должны иметь возможность легкого отделения от тела выращиваемой модели, и достигается это путем снижения площади поверхности в месте контакта поддержки и нависающей части изделия. Снижение площади контакта осуществляется путем формирования конусной части на конце поддерживающей структуры или намеренного оставления зазора в 0,05–0,15 мм между нависающей частью модели и телом поддержки. Однако ультимативным решением является печать поддержек из химически растворимого материала, отличного от материала модели, в таком случае существует возможность простого отделения поддержек путем промывки изделия в специализированном растворе или в проточной воде. Такой тип построения позволяет удалять поддержки без потери качества самой модели, но требует наличия принтера специальной конструкции, т. е. имеющего 2 или более экструдера или же установленную систему смены материалов.

В целом для печати изделий по технологии FFF/FDM применяются поддержки 2-х типов: древовидная и вертикальная (рис. 3.3). Из двух этих типов поддержек предпочтительной является древовидная поддержка, так как она гораздо легче отделяется от модели и за счет своих изгибов может достаточно просто проходить даже в самые труднодоступные места. Однако следует заметить, что древовидная поддержка не является панацеей и имеет свои недостатки, а именно гораздо больший расход материала на тело поддержки и сильно увеличенное время как автоматического написания управляющего G-кода, так и время непосредственной печати изделия.



Рис. 3.3. Общий вид поддерживающих структур модели

В качестве вспомогательных структур при печати, помимо поддержек, также подвергаются настройке так называемые «адгезивные конструкции», они призваны увеличить площадь соприкосновения модели с поверхностью построения и за счет этого повысить адгезию. Но применение данных структур может значительно увеличить время печати моделей.

Помимо важных и необходимых настроек трехмерной печати, существуют также настройки специфического характера, применяемые только в определенных условиях. Наиболее интересными из этих настроек являются, например, настройки печати кожуха. Данная группа настроек отвечает за формирование кожуха в виде тонкого купола или стенки вокруг печатаемой модели, что позволяет в некоторых случаях осуществлять печать требовательными к температурным режимам полимерами на принтерах открытой конструкции. Также к группе специфических параметров относится функция, отвечающая за небольшое изменение геометрии изделия, позволяющее печатать нависающие элементы без использования поддержек. Данная настройка применима только в тех случаях, в которых геометрия получаемого изделия не является критически важной в местах, где производится ее изменение.

Порядок выполнения работы

Подключить принтер и источник бесперебойного питания к сети. Осуществить удаление старого адгезивного покрытия, включить принтер и нанести новое адгезивное покрытие в соответствии с рекомендациями, указанными в общих сведениях. Отправить печатающую головку в позицию дома, после чего осуществить калибровку стола принтера в соответствии с рекомендациями, указанными в данной работе. Подключить принтер к управляющему ПО и осуществить написание управляющего кода для любой из выданных 3D-моделей с подробной настройкой основных режимов печати. Запустить печать и дождаться ее окончания, после чего оценить влияние настроенных параметров на общий вид изделия.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Описание настраиваемых в текущей работе параметров и их влияние на модель.
5. Ответы на контрольные вопросы;
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что входит в подготовительные операции FFF/FDM 3D-печати?
2. Что такое адгезивы и для чего они применяются?
3. Опишите последовательность действий при калибровке поверхности построения FFF/FDM-принтера.
4. Перечислите основные режимы печати и их влияние на характеристики получаемой модели.
5. Перечислите рекомендованные высоты слоев модели.
6. Опишите влияние температурных режимов на процесс печати.
7. Перечислите и опишите специфические настройки печати.

Практическая работа № 4

ПОСТОБРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ПОСЛЕ FFF/FDM-ПЕЧАТИ

Цель работы: освоение основных приемов постобработки моделей и получение практических навыков по ручной обработке моделей после печати.

Приборы и материалы: FFF 3D-принтер, источник бесперебойного питания, управляющее ПО принтера, ЭВМ, полимер для печати, набор инструментов для мелкой работы, пинцет, кусачки, канцелярский нож, коврик для резки, ручной гравёр и набор сменных насадок к ней, наждачная бумага, сахар, кисточка, растворитель, система местной вентиляции, электроплитка, лабораторная посуда, набор для нанесения гальванических покрытий (лабораторный источник питания, комплект проводов, электрические клеммы, электролит, емкость для электролита, графитовая краска, металлические пластинки), комплект СИЗ (очки, респиратор, плотные защитные перчатки).

Общие сведения

Постобработкой моделей называется последовательность операций, направленных на повышение качества моделей после их выращивания. К постобработке моделей относят операции отделения поддержек и прочих вспомогательных структур, сборки и склеивания моделей, операции улучшения качества наружных поверхностей модели (абразивная, химическая или физико-химическая обработка поверхностей), а также нанесение различного рода покрытий, в том числе и металлических гальваническим путем.

Отделение поддержек и вспомогательных структур может производиться как механическим, так и химическим путем, а в случае печати легкоплавкими материалами даже термическим.

При отделении поддержек механическим путем (рис. 4.1) применяется набор инструментов для мелкой работы (пинцет, кусачки, скальпель или канцелярский нож, шило, круглогубцы и т. д.). Не рекомендуется производить данную операцию без защитных очков и плотных перчаток, так как при работе с полимерами необходимо быть крайне внимательным и строго соблюдать технику безопасности.

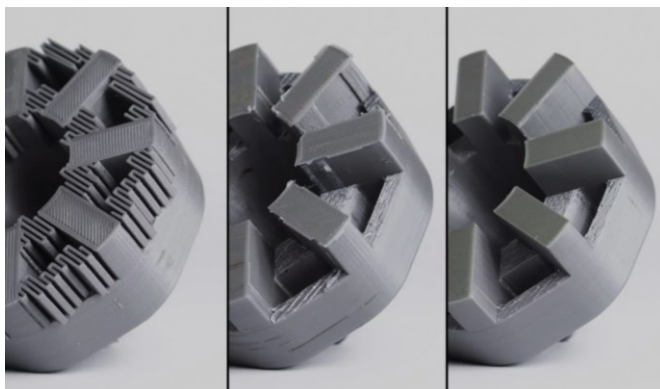


Рис. 4.1. Процесс удаления поддержек (слева направо)

Для удаления поддерживающих структур химическим (рис. 4.2) путем сами поддержки выращиваются из материала, отличного от материала самой модели. В качестве материала поддержек применяются водорастворимые (PVA, BVOH, Aqasys 120) и материалы растворимые в органических веществах (HIPS, PVB, АТР).

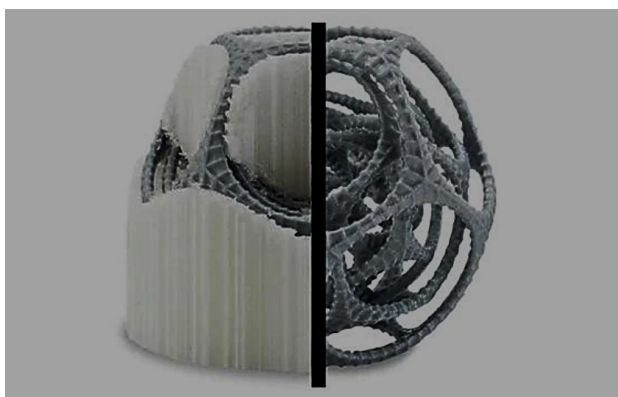


Рис. 4.2. Результат химического удаления поддержек с модели

В случае химического удаления поддержек напечатанная модель погружается на определенное время в агрессивную для материала поддержек среду. Для значительного ускорения процесса, примерно в 10–15 раз, применяются ультразвуковые ванны, причем необязатель-

но заполнять весь объем ванны растворителем (в случае применения органических веществ). Для экономии растворяющего вещества модель помещается в небольшую емкость, наполненную растворителем, а уже саму емкость помещают в ультразвуковую ванну, наполненную водой, такой метод не создает значительных препятствий для ультразвуковых колебаний и значительно снижает расход растворителя.

После химического удаления поддержек модели следует промыть в проточной воде в течение 1 минуты.

Тепловое или же термическое удаление поддержек (рис. 4.3) применяется в случае печати легкоплавкими материалами, чаще всего воском или же его аналогами. В случае применения термически удаляемых поддержек печать модели производится двумя экструдерами (по аналогии с химически удаляемыми поддержками), содержащими схожие между собой материалы (для лучшей спекаемой между собой), разница между этими материалами заключается лишь в температуре плавления, при этом разница в температурах может составлять 10–20°. А удаление поддержек осуществляется в су-видах или же печах с жесткой терморегуляцией. Су-вид представляет собой прибор, состоящий из ванны, наполненной водой, и системы ее точного подогрева и циркуляции. В су-виде вода подогревается до температуры плавления материала поддержек, после чего туда помещается модель, поддержки постепенно плавятся, а материал поддержек всплывает на поверхность су-вида, где осуществляется его сбор и повторное применение. Сама модель после обработки в су-виде помещается под струю теплого воздуха до полного испарения остатков влаги.



Рис. 4.3. Общий вид моделей с восковыми поддержками

Сборка и склеивание частей модели производится после отделения поддержек. Склеивание осуществляется при помощи специальных клеевых составов для полимеров и ведется по заранее подготовленным поверхностям. Процесс склеивания осуществляется в соответствии с инструкцией от производителя клеевого состава. А сборка, как правило, ведется по заранее подготовленным местам под посадочные штыри, они могут быть напечатаны вместе с моделью.

Операции ремонта и подготовки поверхности моделей идут за операциями сборки и склеивания. Как правило, они направлены на удаление возможных разрывов поверхности, возникших в результате сбоев процесса печати. Ремонт разрывов поверхности заключается в запаивании или наплавлении материала моделей в области разрывов, данная операция осуществляется при помощи паяльника или строительного фена, а также с применением присадочного материала, аналогичного материалу модели.

Обработка поверхности модели заключается в абразивной подготовке поверхности для улучшения параметров ее шероховатости. Данная обработка выполняется при помощи абразивного ручного инструмента (рашпили, надфили, наждачная бумага, бормашинка с различными насадками и т. д.).

Для снижения параметров шероховатости, помимо абразивной обработки, применяются химические, тепловые и теплофизические способы обработки. К химическим способам обработки можно отнести обработку моделей в парах ацетона (рис. 4.4). Данный способ обработки придает поверхности моделей минимальную шероховатость и высокую гладкость. Однако применение такого метода имеет ряд значительных недостатков, одним из которых является отсутствие жесткого контроля над величиной снимаемого слоя и его равномерностью, а вторым не менее важным недостатком является высокая токсичность паров ацетона.

Схожести с эффектом от обработки моделей парами ацетона можно добиться при обработке моделей струей горячего воздуха. Недостатки такого метода обработки практически те же, что и при обработке ацетоном, однако токсичность данного метода гораздо ниже. При таком методе присутствует нежелательное прогревание модели на большую глубину, что может приводить к плавлению всего объема модели.



Рис. 4.4. Модель до (слева) и после (справа) обработки парами ацетона

Последним этапом постобработки моделей при необходимости является нанесение различных покрытий, в том числе и гальваническое покрытие (рис. 4.5) поверхности полимера различными металлами для повышения износостойкости напечатанных моделей. Нанесение гальванических покрытий производится в среде жидкого электролита, а модель при этом окрашивается токопроводящей краской. Часто для этих целей применяются краски на основе графита.

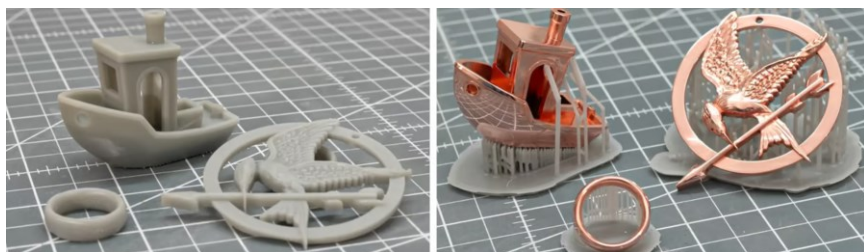


Рис. 4.5. Модель до (слева) и после (справа) нанесения гальванического покрытия

Порядок выполнения работы

Осуществить печать составного модельного комплекта по выданной 3D-модели в 4 экземплярах. Произвести удаление вспомогательных структур, затем произвести сборку/склейку частей модельного комплекта воедино. Произвести подготовку поверхности для трех из напечатанных моделей при помощи ручного инструмента. Одну из моделей обработать парами ацетона. Для этого модель помещается

в закрытую камеру с находящейся в ней подогреваемой емкостью, наполненной ацетоном. После закрытия камеры осуществляется подогрев емкости с ацетоном до температуры его испарения. В таком режиме модель выдерживается около 3–5 минут, после чего извлекается (обязательно использование СИЗ и системы местной вентиляции). Затем взять аналогичный модельный комплект и произвести его окрашивание токопроводящей краской, после чего подсоединить к нему катод, а к аноду при помощи зажима подсоединить пластинку осаждаемого металла (в данном случае меди), поместить модель с подключенным к ней катодом вместе с медной пластинкой на аноде в раствор электролита. Подсоединить обратные стороны катода и анода в соответствующие разъемы на лабораторном источнике питания, после включить его в сеть и постепенно увеличивать ток и напряжение до тех пор, пока в ванне с электролитом не начнется процесс растворения медной пластинки с выделением пузырьков газа. Дождаться появления тонкого слоя меди на поверхности модели и сравнить качество поверхности с остальными образцами (необработанным, обработанным механически и химически). Оформить отчет.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Описание процесса произведенной обработки моделей.
5. Сравнительный анализ полученных после различных типов обработки моделей.
6. Ответы на контрольные вопросы.
7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Что входит в операции постобработки при FFF/FDM 3D-печати?
2. Какие способы удаления поддержек существуют и в каких ситуациях они применяются?
3. Как осуществляется процесс нанесения гальванических покрытий на полимерные модели?
4. Из каких материалов могут быть изготовлены поддержки?
5. Что такое су-вид и для чего он применяется?

Практическая работа № 5

ДЕФЕКТЫ ТРЕХМЕРНОЙ FFF/FDM-ПЕЧАТИ, СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Цель работы: разбор известных дефектов и способов их устранения; выработка навыков быстрого определения причин возникновения тех или иных дефектов.

Приборы и материалы: FFF 3D-принтер, источник бесперебойного питания, управляющее ПО принтера, ЭВМ, полимер для печати, набор инструментов для мелкой работы, пинцет, кусачки, канцелярский нож, коврик для резки, ручной гравер и набор сменных насадок к ней, наждачная бумага, сахар, комплект СИЗ (очки, респиратор, плотные защитные перчатки).

Общие сведения

Процесс трехмерной печати является достаточно нестабильным процессом по причине наличия большого числа факторов, влияющих на качество получаемых в итоге моделей. На данный процесс влияют не только температурные режимы, но и жесткость кинематики, стабильность адгезивных свойств покрытия поверхности построения по всей площади построения, усадка нанесенного полимера, степень износа сопла принтера, скорость печати, плавность работы шаговых двигателей, ошибки G-кода и многое другое.

За счет наличия такого большого числа влияющих на печать факторов на модели могут возникать различного рода дефекты, которые могут быть вызваны не только одним, но и совокупностью нескольких факторов.

Все дефекты FFF/FDM-печати делятся на два типа: физические и программные.

Физическими называют дефекты, возникающие по причине физически не корректно работающей кинематики принтера или из-за изменения микроклимата среды, в которой осуществляется трехмерная печать. Такие дефекты можно устранить непосредственно вмешательством в конструкцию принтера.

Программные же дефекты вызваны, как правило, некорректно настроенными режимами печати или сбоем в последовательности исполнения поступающих команд G-кода внутри управляющей платы 3D-принтера.

Первой и наиболее распространенной проблемой трехмерной FFF/FDM-печати является отсутствие адгезии выращиваемой модели к поверхности построения (рис. 5.1). Проявляется слабая адгезия к столу принтера в частичном или полном отлипании модели от поверхности построения в начале или на любой другой стадии печати. Данный дефект является фатальным для печатаемой модели, так как изделие в результате частичного или полного отлипания редко подлежит исправлению. Как правило, около 95 % изделий, отклеившихся от поверхности построения в процессе печати, не подлежат исправлению.

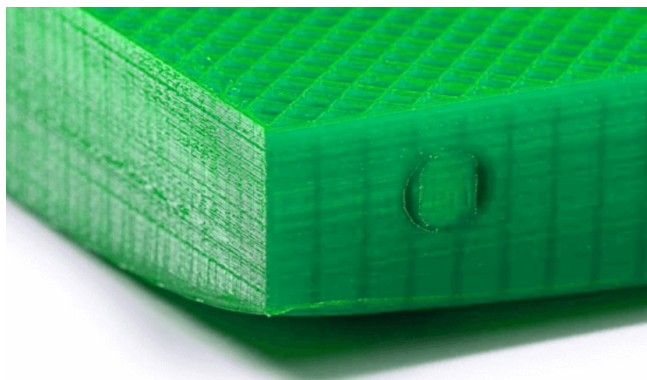


Рис. 5.1. Общий вид модели, имеющей плохую адгезию к столу 3D-принтера

Основной причиной появления данного вида дефекта является, в первую очередь, неправильно произведенная калибровка поверхности построения, что ведет к неравномерному зазору по всей площади поверхности построения. Следующим фактором, влияющим на отлипание модели, является высокая скорость печати первого слоя. При высоких скоростях печати полимер просто не успевает надежно склеиться с поверхностью построения, что и приводит к постепенному отлипанию модели. Также на адгезию влияет качество нанесенного адгезива и степень его износа. При печати больших изделий материалами, обладающими сильной усадкой, отлипание модели от стола является следствием усадочных напряжений, для борьбы с данным явлением рекомендуется наличие подогрева камеры печати, чтобы скомпенсировать часть усадочных напряжений.

Достаточно значительное влияние на адгезию материала к поверхности стола оказывают температурные режимы печати. При плохой адгезии имеет смысл дополнительный подогрев поверхности построения модели до 60–70° при использовании PLA, PETG, ABS полимеров, а также их аналогов. Однако превышать данные значения не рекомендуется, так как это вызовет появление других дефектов. Важно также следить за мощностью обдува зоны печати, так как чрезмерное ее охлаждение ведет к усилению усадочных процессов, что непременно приведет к деформации модели и ее отклеиванию.

Следующим дефектом трехмерной печати является недостаточная экструзия материала (недоэкструзия) (рис. 5.2).

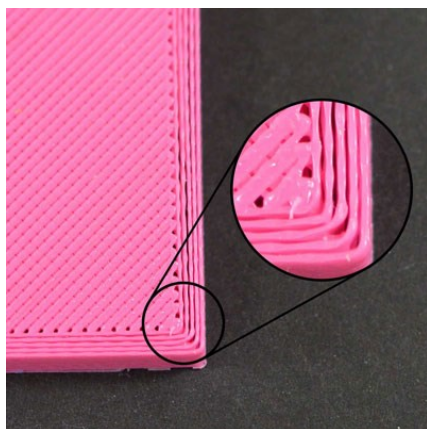


Рис. 5.2. Недоэкструзия материала

Данный дефект проявляется в виде тонких слоев материала, плохо или и вовсе не скрепленных между собой. Модель с таким дефектом не является герметичной и обладает малой прочностью, а при воздействии на модель нагрузок разрушается по границам слоев.

Причинами возникновения данного дефекта являются неверно указанный в программе диаметр полимерной нити, малый коэффициент экструдирования (поток) или же частично засоренное сопло 3D-принтера.

Обратным дефектом недоэкструзии является переэкструзия (рис. 5.3) или же увеличенный расход материала на единицу площади построения модели.

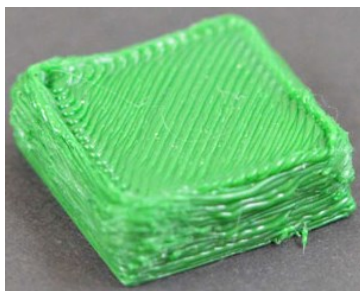


Рис. 5.3. Общий вид дефекта переэкструзии

Причины возникновения данного вида дефекта все такие же, как и при недоэкструзии, только в случае переэкструзии материала подается больше, чем требуется, и модель, как правило, полностью или частично теряет очертания своей изначальной геометрии.

Переэкструзия и недоэкструзия также могут проявляться и локально, например, только на нижних и верхних слоях модели. Это связано с некорректными настройками подачи материала в определенных частях геометрии, решается, как правило, на программном уровне.

Следующим достаточно распространенным дефектом 3D-печати по технологии FFF/FDM является наличие тонких нитей или же паутинки (рис. 5.4) между разнесенными в пространстве частями печатаемой модели. Это связано с образованием тянущихся за соплом нитей полимера за счет его высокой вязкости.

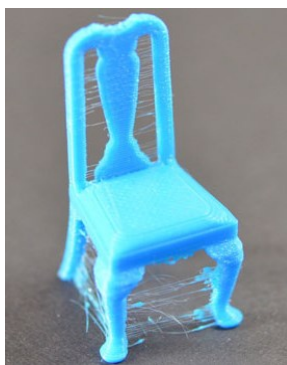


Рис. 5.4. Общий вид дефектной модели, опутанной тонкими нитями полимера

Данный дефект устраняется путем правильной настройки рывков, ускорений и ретрактов, а также параметров охлаждения зоны печати, т. к. при повышенной температуре зоны печати полимер более активно тянется из сопла и не обрывается от рывков и ретрактов.

Следующий дефект связан с высокой температурой сопла при печати и проявляется в виде частичного или полного расплавления мелких частей модели (рис. 5.5).

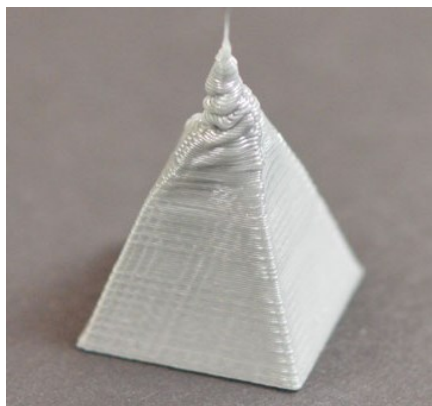


Рис. 5.5. Общий вид изделия, напечатанного при повышенных температурах

Для устранения данного дефекта необходимо проверить температуры печати и снизить их. Иногда случается, что термический резистор (термистор), осуществляющий измерение температуры, может не отражать реальные температуры печати, что может приводить к сильному перегреву материала. Если же термистор отражает реальную температуру, то в таком случае следует повысить мощность системы охлаждения во время печати мелких элементов изделия. Если же повышение мощности системы охлаждения по каким-либо причинам невозможно, то следует максимально разнести мелкие части модели по области печати (в случае множественной печати изделий) или же программно задать последовательную печать определенных зон модели.

Существует так называемый дефект расслоения, при котором модель во время или после печати расщепляется на слои (рис. 5.6).



Рис. 5.6. Расслоение модели во время печати

Данный дефект печати приводит к неисправимому браку изделия и возникает, как правило, из-за большой высоты слоя печатаемой модели относительно сопла принтера. Толщина слоя должна быть как минимум на 15–25 % меньше, чем диаметр сопла, так как при таком соотношении сопло своей площадью производит разглаживание выдавливаемого полимера и как бы припекает два разогретых слоя между собой. В случае нарушения данного соотношения спекание слоев значительное влияние оказывают адгезивные свойства самого полимера и температуры его печати.

Одним из достаточно неприятных дефектов трехмерной полимерной печати являются так называемые натеки и «прыщи» на поверхности печатаемого изделия (рис. 5.7).

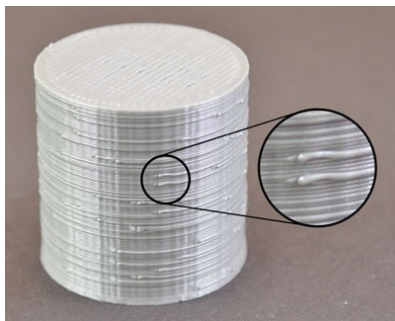


Рис. 5.7. Натеки на поверхности изделия

Возможными причинами появления данного дефекта являются корректные настройки параметров ретракта при переходе от слоя к слою модели. В таком случае полимер недостаточно втягивается в сопло и вытекает при следующем выдавливании на модель. Однако такого рода дефекты иногда возникают во время печати тормозов управляющей платы или в результате проблем с передачей данных во время потоковой их передачи во время печати. Данная проблема устраняется путем налаживания стабильного соединения между ЭВМ и принтером, разгрузкой ЭВМ. Подвисания ЭВМ также сказываются на потоковую передачу данных.

Так называемый вобблинг или же смещение слоев по координатам XY (рис. 5.8) при подъеме по высоте вдоль координаты Z приводит к высокой шероховатости поверхности и несоблюдению ее геометрии. Является достаточно серьезным и сложно устранимым дефектом. Может быть связан как с неравномерной экструзией, так и с колебаниями температуры, но часто причиной являются проблемы с механической частью принтера. Данный дефект, как правило, является комплексным.

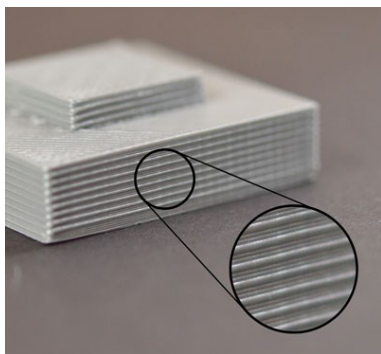


Рис. 5.8. Вобблинг на поверхности модели

Волны на поверхности модели (рис. 5.9) по осям XY возникают в случае слишком больших скоростей и ускорений печати и, как следствие, повышенных вибраций. Также данный дефект может быть вызван проблемами с кинематикой 3D-принтера. Особенно проявляется на моделях, имеющих множество углов и поворотов боковых стенок.

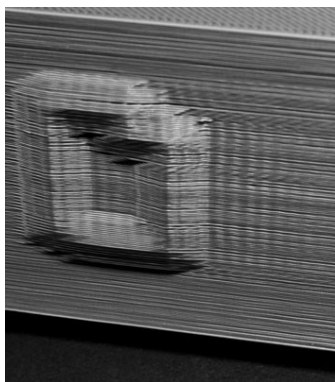


Рис. 5.9. Волны на поверхности объекта

Для частичной компенсации или полного устранения дефекта, показанного на рис. 5.9, на некоторых моделях 3D-принтеров устанавливается акселерометр, считывающий вибрации печатающей головки принтера. На основании показаний акселерометра управляющая плата принтера включает реверс по определенным координатам, таким образом, как бы компенсируя вибрации печатающей головки.

Дефект «слоновья нога» (рис. 5.10) не является критическим для печати, однако увеличивает продолжительность постобработки моделей.

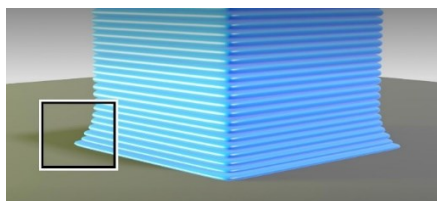


Рис. 5.10. Дефект «слоновья нога»

«Слоновьяй ногой» называют деформацию печатаемой модели в виде постепенно расширяющихся слоев по мере приближения к поверхности построения. Возникает данный дефект вследствие неверной калибровки поверхности построения (рис. 5.11) или вследствие ее сильного перегрева, а также ввиду неправильно настроенного потока материала на первых слоях модели.

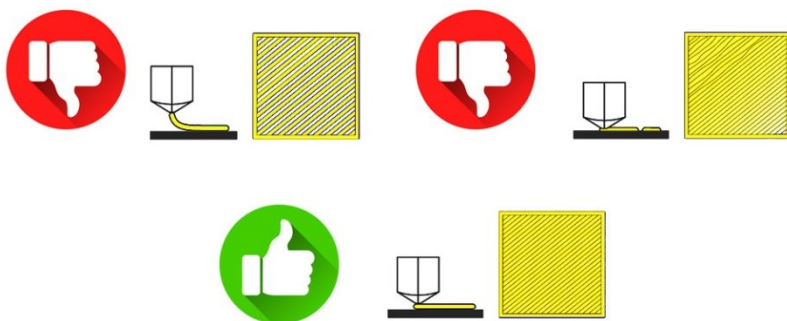


Рис. 5.11. Образцы печати первого слоя при различных калибровочных зазорах

Для выявления дефектов печати существуют специальные калибровочные 3D-модели, их, как правило, печатают в первую очередь. Именно по ним оценивается не только правильность настройки оборудования, но и осуществляется корректировка настроек управляющей программы.

Порядок выполнения работы

Осуществить печать выданных преподавателем трехмерных моделей. Оценить дефекты на полученных моделях, проработать способы их устранения. Произвести постобработку моделей и оценить влияние постобработки на возникшие дефекты трехмерной печати. Произвести настройку оборудования для трехмерной печати, направленную на устранение дефектов, после чего произвести повторную печать моделей и произвести сравнительную оценку качества печати до и после настройки принтера.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Описание и зарисовка возникших на модели дефектов после печати.
5. Описание способов устранения полученных дефектов.

6. Описание эффективности принятых мер по устранению дефектов печати.
7. Ответы на контрольные вопросы.
8. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют группы причин образования дефектов?
2. Какие дефекты трехмерной печати встречаются и как с ними бороться?
3. Перечислите дефекты, возникающие при неправильном температурном режиме печати.
4. Какие дефекты возникают в случае неполадок в работе кинематики принтера?
5. Как калибровка стола влияет на образование дефектов?

Практическая работа № 6

ФОТОПОЛИМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ, SLA-, DLP-, LCD-ТЕХНОЛОГИИ ПЕЧАТИ

Цель работы: получение навыков фотополимерной печати, разбор известных технологий фотополимерной печати и конструкций SLA-, DLP-, LCD-технологий печати, а также разбор подготовительных операций и операций финишной обработки моделей.

Приборы и материалы: трехмерный LCD-принтер, ПЭТ пленка, калибровочная бумага, набор инструментов, система местной вентиляции, фотополимерная смола, пластиковый шпатель, бумажные фильтры для смолы, ПО принтера, ЭВМ, ультрафиолетовая камера, изопропиловый спирт, СИЗ (перчатки медицинские, маска-респиратор, фильтр от органических паров, очки).

Общие сведения

Стереолитография – это процесс аддитивного производства, при котором выращивание моделей осуществляется путем полимеризации смолы под действием ультрафиолета (рис. 6.1).

При технологиях фотополимерной печати модель получается селективным отверждением жидкой фотополимерной смолы.

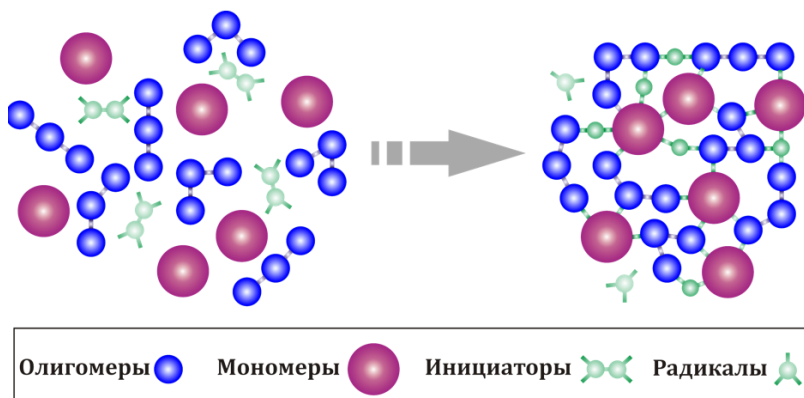


Рис. 6.1. Процесс полимеризации светочувствительных смол

Основных технологий фотополимерной печати существует три: SLA, DLP, LCD. Данные технологии очень схожи между собой и отличаются лишь способом засветки смолы (рис. 6.2). В случае SLA-технологии засветка смолы осуществляется при помощи концентрированного пучка ультрафиолета (лазера), направляемого при помощи системы подвижных зеркал. Технология SLA-печати является самой точной из представленных технологий, однако в то же время является самым длительным процессом печати.

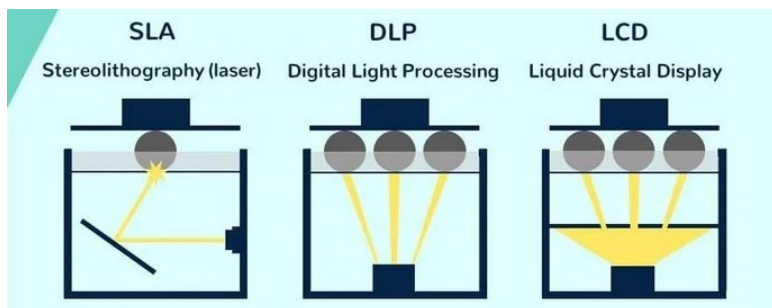


Рис. 6.2. Принцип ультрафиолетовой засветки фотополимерной смолы

В качестве альтернативы технологии SLA была разработана технология DLP как попытка ускорить процесс печати, не потеряв при этом значительно в точности изготовления моделей. В основе DLP-технологии лежит засветка слоев модели при помощи ультрафиолетового проектора, находящегося под ванной с фотополимерной смолой, имеющей прозрачное дно. Данный метод позволил в несколько раз ускорить процесс печати, т. к. проектор, в отличие от лазера, засвечивает всю область печати в координатах XY.

С развитием полупроводниковой промышленности, а также появлением жидкокристаллических дисплеев LCD, их немного упрощенные версии стали устанавливать в фотополимерные принтеры. В основе LCD-технологии фотополимерной печати лежит ультрафиолетовая засветка смолы посредством монохромного ультрафиолетового LCD-дисплея. Применение LCD-дисплеев вместо проекторов позволило сильно удешевить производство фотополимерных принтеров и повысить не только ресурс принтера, но и качество печати и надежность конструкции принтера в целом.

Технологии фотополимерной печати являются одними из самых точных, минимальный размер слоя может достигать 10 мкм, а в некоторых случаях и 5 мкм. При этом получаемые модели имеют минимальную шероховатость. Однако печать моделей по данной технологии требует гораздо больше времени, примерно 10–25 раз (зависит от технологии фотополимерной печати), чем в случае FFF/FDM-технологии.

В связи с такой высокой точностью и очень длительным процессом печати, данная технология применяется для изготовления ответственных изделий малого размера, как правило, область печати таких принтеров редко превышает 10–15 см по всем трем координатам.

Независимо от технологии, общая компоновка классического фотополимерного принтера остается неизменной (рис. 6.3).

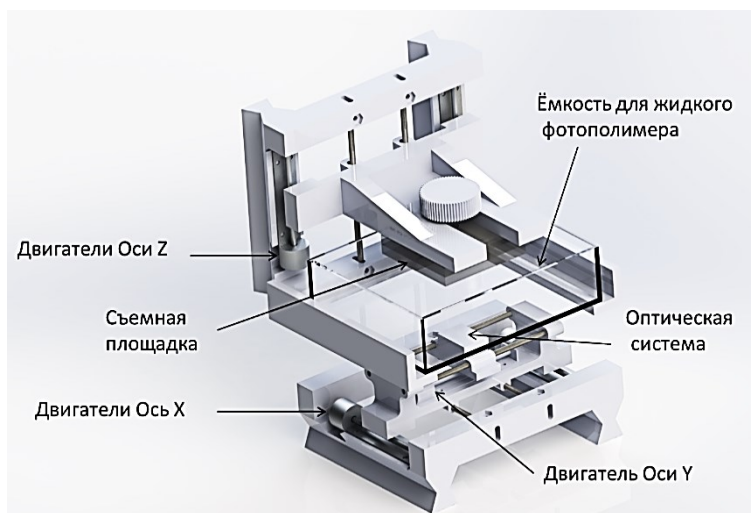


Рис. 6.3. Компоновка фотополимерного принтера

Процесс печати фотополимерного принтера выглядит следующим образом: съемная площадка, на которой располагается поверхность построения, опускается вниз, погружаясь в ванну с фотополимером, оставляя зазор между прозрачным дном ванны и поверхностью построения, равный толщине засвечиваемого слоя; далее включается ис-

точник УФ-излучения (оптическая система), который осуществляет засветку первого слоя модели в течение заданного программой времени (оно зависит от свойств фотополимерной смолы и мощности УФ-излучения); после полимеризации первого слоя платформа построения поднимается вверх до выхода из ванны с фотополимерной смолой (это необходимо для равномерного заполнения смолой засвечиваемой области, т. к. фотополимерные смолы достаточно вязкие); после чего платформа снова опускается вниз, оставляя зазор между днищем ванны и поверхностью построения, равный уже двум слоям модели; далее процесс повторяется до полного завершения. Стоит также отметить, что весь процесс печати происходит в полностью закрытой камере, а ее прозрачные элементы имеют УФ-фильтры для исключения самопроизвольной полимеризации смолы.

К подготовительным операциям для фотополимерной печати относятся: калибровка поверхности построения, заправка ванны фотополимерной смолой, настройка управляющего ПО, натяжка ПЭТ-пленки на обод емкости для фотополимерной смолы.

Калибровка поверхности построения на фотополимерном принтере имеет свои особенности и производится иначе, чем на FFF/FDM-принтере.

При калибровке платформа построения поднимается вверх на несколько сантиметров от ЖК-дисплея, ванна для фотополимера при этом демонтируется. Далее производится отжатие фиксирующих платформу винтов (как правило, их 4), чтобы она имела возможность свободного перемещения под собственным весом. Затем на ЖК-дисплей укладывается специальная калибровочная карта из бумаги определенной толщины (рис. 6.4), как правило, эта толщина равняется толщине ПЭТ-пленки принтера. После чего платформе принтера необходимо задать команду «дом» (возврат в нулевые координаты) и дожидаться перемещения платформы вниз, до касания с калибровочной бумагой. После чего необходимо зажать калибровочные винты, фиксирующие платформу. Далее необходимо программно приподнять платформу по 0,01 мм до тех пор, пока калибровочная бумага при ручном усилии не начнет слегка перемещаться под платформой. Последним этапом калибровки необходимо задать, что текущая координата платформы является нулевой, посредством использования команды «Set 0».



Рис. 6.4. Процесс калибровки фотополимерного принтера

Заправка ванны фотополимером осуществляется через специальные лабораторные фильтры из бумаги (рис. 6.5). Это необходимо для предотвращения попадания твердых частиц фотополимерной смолы в ванну, что может привести к повреждению LCD-дисплея внизу при опускании платформы. Фотополимерная смола имеет относительно небольшой срок хранения (около 1 года), а далее начинает деградацию, т. е. постепенную кристаллизацию прямо в емкости хранения без воздействия ультрафиолета.



Рис. 6.5. Лабораторные фильтры для фотополимерной смолы

Заполнение ванны ведется до специальной отметки, после чего оставшаяся смола в фильтре сливается в отдельную емкость. Смешивать смолу, побывавшую под воздействием естественного или искусственного освещения со свежей смолой в одной емкости хранения, не рекомендуется.

Настройка управляющего ПО (рис. 6.6) заключается в указании верных параметров фотополимерного принтера и смолы. Необходимо также обратить внимание на тот факт, что смола подбирается для каждого принтера индивидуально и зависит от типа используемой технологии фотополимерной печати, мощности УФ-излучения от источника, а также определенной длины волны излучаемого ультрафиолета. В случае неверно подобранной смолы процесс полимеризации не будет протекать в достаточной степени и модель будет формироваться очень мягкой или не будет формироваться вообще.

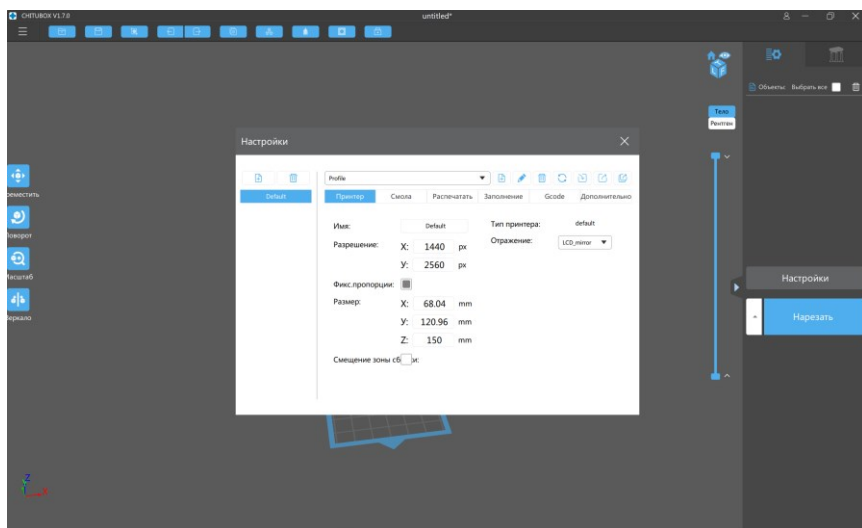


Рис. 6.6. Общий вид интерфейса управляющей программы

Процесс печати производится полностью в автоматическом режиме и вмешательства не требует, более того, не подразумевает каких-либо настроек в процессе печати, в отличие от

FFF/FDM-печати. Также, в отличие от FFF/FDM-печати, при фотополимерной печати модели в основном изготавливаются монолитными и в 90 % случаев не предусматривают структур заполнения.

В конце фотополимерной печати всю неизрасходованную смолу следует слить через лабораторный фильтр в отдельную емкость и тщательно промыть ванночку для смолы изопропиловым спиртом или его аналогами. Это требуется для предотвращения помутнения ПЭТ-пленки (прозрачного днища ванночки) за счет остатков фотополимерной смолы, что в дальнейшем приводит к рассеиванию проходящего через нее УФ-излучения и вследствие приводит к значительному ухудшению качества печати.

Модель после печати также промывают изопропиловым спиртом в ультразвуковой ванне для удаления излишков жидкой смолы, после чего производят дополнительную засветку мощным потоком УФ-излучения в ультрафиолетовой камере, в результате чего модель набирает необходимую прочность.

Порядок выполнения работы

Подключить принтер к сети, осуществить калибровку поверхности построения в соответствии с описанной методикой, натянуть ПЭТ пленку на нижнюю часть ванночки для фотополимера. Установить ванночку на принтер. Произвести настройку ПО и по выданной преподавателем 3D-модели осуществить написание управляющего кода. Перенести код на 3D-принтер, после чего включить устройство местной вентиляции и заполнить ванночку фотополимерной смолой до нужного уровня. Закрыть область печати защитным кожухом и запустить печать (все операции с фотополимерной смолой производить только в СИЗ). По окончании печати снять платформу построения с принтера и отсоединить от нее модель. Далее осуществить промывку модели в изопропиловом спирте и поместить ее в ультрафиолетовую камеру. Удалить остатки смолы со всех элементов 3D-принтера при помощи изопропилового спирта. Достать модель из УФ-камеры и отделить поддержки. Оформить отчет о проделанной работе.

Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Описание и рисунок устройства LCD-принтера.
5. Подробное описание подготовительных операций.
6. Ответы на контрольные вопросы.
7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют технологии фотополимерной печати, их достоинства и недостатки?
2. Как происходит процесс печати на фотополимерном принтере?
3. В чем заключаются особенности настройки фотополимерного принтера?
4. По каким параметрам подбирается фотополимер?
5. Опишите меры предосторожности при работе с фотополимерами.
6. Как осуществляется процесс полимеризации светочувствительных смол?

Список литературы

1. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 217 с.
2. Шкуро, А. Е. Технологии и материалы 3D-печати : учеб. пособие [Электронный ресурс] / А. Е. Шкуро, П. С. Кривоногов. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – 98 с.
3. Additive Manufacturing of High-performance Metals and Alloys : Modeling and Optimization / ed. : I. Shishkovsky. – Intechopen, 2018.
4. Каменев, С. В. Технологии аддитивного производства : учебное пособие / С. В. Каменев, К. С. Романенко. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2017. – 145 с.
5. 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies / ed. : L. J. Kumar, P. M. Pandey, D. I. Wimpenny. – Springer, 2019. – 308 p.
6. Zohdi, T. I. Modeling and Simulation of Functionalized Materials for Additive Manufacturing and 3D Printing : Continuous and Discrete Media : Continuum and Discrete Element Methods / T. I. Zohdi. – Springer, 2018. – 308 p.
7. Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies / ed. : D. I. Wimpenny, P. M. Pandey, L. J. Kumar. – Springer, 2017. – 195 p.

Учебное издание

ДИКУН Альберт Олегович
РОВИН Сергей Леонидович

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности
6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование
и производство материалов и изделий из них»
профилизации «Аддитивные технологии в литейном производстве»

В 2 частях

Ча с т ь 1

**ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ
ТВЕРДЫМИ ПОЛИМЕРАМИ
И ФОТОПОЛИМЕРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

Редактор *Р. А. Ягелло*
Компьютерная верстка *А. В. Степанкиной*

Подписано в печать 17.04.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,19. Уч.-изд. л. 2,30. Тираж 100. Заказ 549.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.