

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ MID-ИЗДЕЛИЙ НА 3D-ПРИНТЕРЕ

#### Цель работы:

Исследование процесса изготовления MID-изделий, определение точности печати 3D-принтера PRUSA i3.

#### Теоретические сведения

**3D-печать** или «аддитивное производство» – процесс создания цельных трехмерных объектов практически любой геометрической формы на основе цифровой модели. 3D-печать основана на концепции построения объекта последовательно наносимыми слоями, отображающими контуры модели. Фактически, 3D-печать является полной противоположностью таких традиционных методов механического производства и обработки, как фрезеровка или резка, где формирование облика изделия происходит за счет удаления лишнего материала (т.н. «субтрактивное производство»). Перечень методов приведен на таблице 2.1.

Процесс печати состоит из ряда этапов:

- Создания или импорта цифровой трехмерной модели
- Обработки цифровой модели для печати с добавлением поддерживающих структур
- Расположения и ориентировки цифровой модели на рабочем столе
- Слайсинга – нарезки цифровой модели на отдельные слои с преобразованием данных в инструкции для работы принтера, называемые G-кодом
- Непосредственно печати
- При необходимости, физической или химической обработки готовой модели

Таблица 2.1 – Сводная характеристика методов аддитивного производства

Метод	Технология	Используемые материалы
Экструзионный	Моделирование методом послойного наплавления (FDM или FFF)	Термопластики (такие как полилактид (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) и др.)
Проволочный	Производство произвольных форм электронно-лучевой плавкой (EBF3)	Практически любые металлические сплавы

Продолжение таблицы 2.1.

Метод	Технология	Используемые материалы
Порошковый	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Практически любые металлические сплавы
Порошковый	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Практически любые металлические сплавы
	Электронно лучевая плавка (EBM)	Титановые сплавы
	Выборочная лазерная плавка (SLM)	Титановые сплавы, кобальт хромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий
	Выборочное тепловое спекание (SHS)	Порошковые термопластики
Струйный	Выборочное лазерное спекание (SLS)	Термопластики, металлические порошки, керамические порошки
	Струйная трехмерная печать (3DP)	Гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси
Ламинирование	Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)	Бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка
Полимеризация	Стереолитография (SLA)	Фотополимеры
	Цифровая светодиодная проекция (DLP)	Фотополимеры

**Метод полимеризации.** Лазерная стереолитография (SLA). Принтер состоит из резервуара, в который налита специальная жидкость (фотополимер). При воздействии на эту жидкость специальным образом (лазер, УФ, ИК) жидкость превращается в твердый пластик.

Сверху в жидкость опускается специальная платформа, затем специальный луч проходит по слою (как правило около 0,03 мм) жидкости под платформой. В результате жидкость затвердевает и прилипает к платформе. Таким образом 3D принтер создает первый слой предмета. Затем принтер поднимает платформу на высоту слоя и все повторяется заново.

Основные плюсы:

- высокая точность, фактически ничем не ограниченная
- скорость печати

– отсутствие технологических проблем с печатью (перегрев, расслаивание, обрушение под весом, сбой маршрута головки, плохое прилипание, отклеивание углов)

**Метод порошковой печати.** Одним из методов аддитивного производства является выборочное спекание порошковых материалов. Слои модели вычерчиваются (спекаются) в тонком слое порошкообразного материала, после чего рабочая платформа опускается, и наносится новый слой порошка. Процесс повторяется до получения цельной модели. Неизрасходованный материал остается в рабочей камере и служит для поддержки нависающих слоев, не требуя создания специальных опор.

Наиболее распространенными являются методы, основанные на спекании с помощью лазеров: выборочное лазерное спекание (SLS), схема установки приведена на рисунке 2.1. Данный метод применяется для работы с металлами и полимерами (например, полиамидом (PA), полиамидом, армированным стекловолокном (PA-GF), стекловолокном (GF), полиэфирэфиркетон (PEEK), полистиролом (PS), алюминидом, полиамидом, армированным углеволокном (Carbonmide), эластомерами) и прямое лазерное спекание металлов (DMLS).

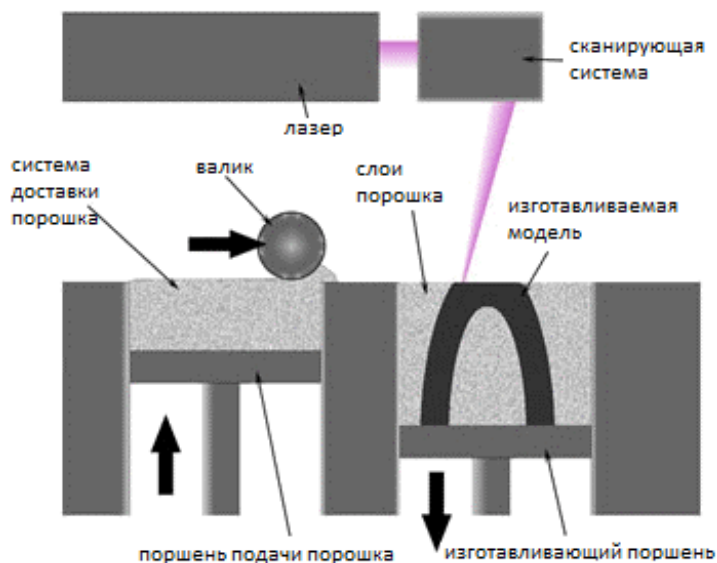


Рисунок 2.1 – Схема установки выборочного лазерного спекания (SLS)

Выборочное лазерное спекание очень близка по своей сути к SLA. Просто вместо жидкости используется порошок. Лазерное спекание – более сложная

технология, так как требует больше энергии на спекание материалов (особенно металлов) + требует механику для очистки и распределения порошка.

Если в SLA жидкость под действием тяжести сама равномерно распределяется по резервуару, то в SLS с порошком подобного не происходит. Поэтому технология использует специальный валик, который равномерно распределяет порошок по поверхности объекта.

**FDM метод** можно считать одним из наиболее технологически простых методов 3D-печати. В основе процесса лежит последовательное наложение тонкой нити расплавленного пластика вплоть до создания цельного трехмерного объекта. В таблице 2.2 приведены характеристики различных пластиков, применяемые в данном методе. В качестве расходного материала используется пластиковая нить, намотанная на катушку. Изредка используются отдельные прутки пластика. Стандартный диаметр нити составляет 1,75мм или 3мм.

**FFF метод печати.** Технология FDM была в конце 1980-х и вышла на коммерческий рынок в 1990 году. Оригинальный термин “Fused Deposition Modeling” и соответствующая аббревиатура – FDM являются торговыми марками компании Stratasys. Энтузиасты 3D-печати, придумали для использования в обход юридических ограничений аналогичный термин “Fused Filament Fabrication” – FFF.

Метод FFF определяется следующим образом: капля одного расплавленного материала (пластика, воска, металла и т.д.) накладывается поверх или рядом с тем же материалом, совершая соединение (нагревом и прилипанием)

Таблица 2.2 – Сравнительная характеристика материалов для экструзивной печати

Характеристики	Тип пластика		
	abs	PLA	HIPS
Температура печати	220-270 град	180-250	230-270
Температура платформы	105-115 град	30-50	Около 90
Температура размягчения	90-105 град.	50°C	
Температура стеклования	100 град	60-65°C	
Температура самовоспламенения	290 — 395		
Минимальная толщина стенки (рекомендуемая)	0.8-1.2 мм	1 мм	
Минимальная толщина слоя (рекомендуемая)	70% от диаметра сопла		
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1.07	1,23-1,25	1,05
Относительное удлинение при разрыве,%		3,80	65
Прочность при растяжении	35-50 МПа (23 град.)	55,3 МПа	62

Продолжение таблицы 2.2.

Характеристики	Тип пластика		
	ABS	PLA	HIPS
Прочность на изгиб	41-45 МПа (23 град.)	57,8 МПа	33
Модуль упругости при растяжении		3,3 ГПа	
Модуль упругости при изгибе		2,3 ГПа	2.280
Твердость (по Роквеллу)	80 — 116 R	R70-R90	
Усадка, %	0.3-0.8	0,1	0,8
Размер мельчайших деталей		0,3 мм	
Водопоглощение (23 град., 24 часа, погружение)	0.2 — 0.3%	0,5-50%	

Характеристики приведенные в таблице 2 во многом носят условный характер. Они зависят от производителя и даже от партии. Кроме перечисленных материалов встречаются такие как поливиниловый спирт (PVA, ПВА), нейлон (nylon), поликарбонат (PC, ПК), полиэтилен высокой плотности (HDPE, ПНД), полипропилен (PP, ПП), поликапролактон (PCL), полифенилсульфон (PPSU), полиметилметакрилат (Acrylic, оргстекло, акрил, ПММА), полиэтилентерефталат (PET, ПЭТ) и другие.

**Полилактид (PLA)** — биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота. PLA-пластик, или полилактид, является наиболее биологически совместимым и экологически чистым из всех материалов, применяемых в 3D-принтерах. Обладает следующими преимуществами:

- размеры стабильны;
- экономия энергозатрат из-за низкой температуры размягчения нити и низкой температуры платформы
- нет необходимости применять каптон для смазывания поверхности для наращивания прототипа;
- гладкость поверхности напечатанного изделия.

Биоразлагаемость PLA-пластика является и основным недостатком этого материала. В таблице 2.3 приведены данные об разлагаемости пластика. Напечатанные с использованием полилактида модели не могут похвастаться долговечностью – под воздействием солнечного света и влаги они полностью разлагаются в период от месяца до двух-трех лет. По этой причине PLA-пластик не используется для печати функциональных деталей. Однако, детали из PLA пластика имеют хорошее скольжение, из него можно делать подшипники скольжения.

Недостатками полилактида также являются 1) медленное застывание – стеклование происходит при температуре приблизительно 50 °С.; 2) повышенная хрупкость и жесткость.

Таблица 2.3 – Время разложение PLA в зависимости от условий среды

Температура [°C]	Сравн. влажность воздуха [%]	Начальная фрагментация спустя	Полное разрушение спустя
4	100	5,3 года	10,2 года
25	20	2,5 года	4,8 года
25	80	2 года	3,1 года
40	80	5,1 мес.	10 мес.
60	20	1 мес.	2,5 мес.
60	80	15 дней	2 мес.

**Ударопрочный полистирол (HIPS)**. По своей структуре HIPS является аморфным материалом, представляющим собой полимер стирола с разными видами синтетического каучука или смесь стирольных сополимеров. Поскольку полистирол при нагревании до температуры экструзии может выделять токсичные испарения, 3D-печать с его использованием необходимо проводить в хорошо проветриваемых помещениях. Одна из особенностей пластика HIPS – полная растворимость в лимонене, позволяющая использовать его также и как материал поддержки. Главное преимущество при использовании HIPS для печати опорных структур состоит в том, что ни он, ни растворитель никаким образом не взаимодействуют с такими видами филаментов, как ABS и PLA, а стоит гораздо дешевле аналогового PVA.

В этом случае возможна печать только на принтерах с 2-мя печатными головками – в один экструдер загружается основной расходный материал, в другой – вспомогательный. Для удаления опорной структуры достаточно ненадолго опустить объект в ванночку с лимоненом,

В сравнении с другими материалами, используемыми при 3D-печати, ударопрочный полистирол обладает рядом преимуществ, среди которых:

- стойкий к воздействиям кислот и щелочей;
- обладает небольшим коэффициентом термоусадки;
- температурный диапазон эксплуатации – от -40 °С до +70 °С;
- низкая в сравнении с ABS и PLA гигроскопичность и не подверженность к разложению;
- хорошая ударная прочность и пластичность готовых изделий, облегчающая проведение механической постобработки;
- хорошие диэлектрические свойства – способен выдерживать большие напряжения, вплоть до 1 кВ.

**ABS-пластик (акрилбутадиенстирол)** – твердая, ударопрочная, термопластичная промышленная смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. В зависимости от необходимых свойств, производитель может варьировать пропорции в пределах: 15-35% Акрилонитрила, 5-30% Бутадиена, 40-60%.

При нормальной температура 23 град. этот материал не представляет никакой опасности. Однако при нагревании или воздействии определенных веществ (например спирт), а так же незначительно при воздействии УФ-излучения, начинает выделять ядовиты состовляющие – бутадиен, акрилонитрил, стирол.

Основные минусы ABS-пластика

— Токсичность при нагревании и воздействии этилового спирта. Загрязняет окружающую среду.

- Может разрушаться от воздействия солнечных лучей
- Худшая детализация отпечатков (по сравнению с PLA-пластиком)
- Непрозрачный материал

4. Основные плюсы ABS-пластика

- Высокая прочность (по сравнению с PLA) на изгиб и разрыв.
- Разнообразная цветовая гамма
- Высокая химическая стойкость (масла, бензин, кислоты, щелочи и т.д.)
- Влагостойкость
- Хорошо поддаётся финишной обработке (шлифовка, грунтовка, покраска и т.д.). Хорошо обрабатывается ацетоном.
- Широкий диапазон эксплуатационных температур.
- Отлично склеивается.
- Практически нулевая усадка готового изделия, не более 1%
- Хорошо связывается с поверхностью для печати, но рекомендуется использовать подогреваемый стол и специальные поверхности для печати.

Применение 3D-печати в электронике можно разделить на два направления: 3D-печать собственно электронных компонентов: печатных плат, антенн и пр. (рисунок 2.2) и производство корпусов и другой вспомогательной оснастки для электроники.

В 2009 году исследователи из университета Иллинойса (США) разработали токопроводящие чернила на основе наночастиц серебра. При печати такие чернила экструдированы из микросопла и наносятся на полимерную подложку. Затем, при нагревании до 150 °С, частицы серебра агломерируют, образуя сплошной массив, и чернильные линии приобретают проводимость. Так появляется возможность создавать рисунок из проводников методом робокастинга (Direct Ink Writing), соединяя ими другие электронные компоненты, что является основой конструирования большинства электронных устройств. Технология робокастинга представлены на рисунках 2.3-2.4.

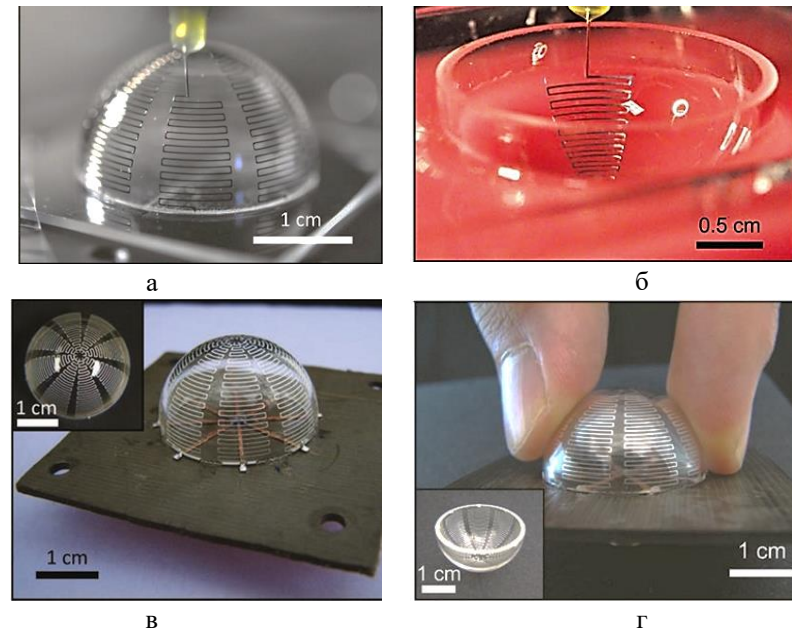


Рисунок 2.2 – Процесс печати антенны из токопроводящего материала на внешней (а) и внутренней (б) поверхностях стеклянной полусферы; (в, г) – готовая антенна.

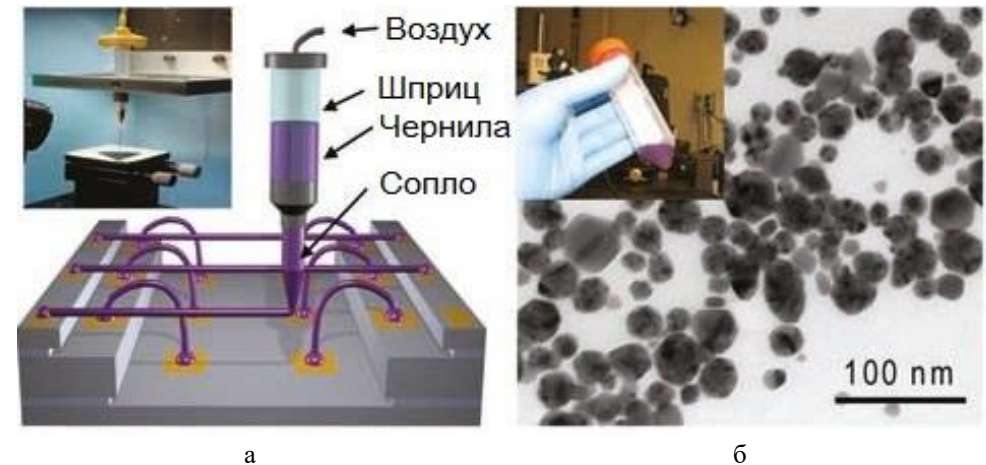


Рисунок 2.3 – Схема изготовления изделий методом робокастинга: а) — конструкция экспериментальной установки для печати проводящими чернилами; б) — электронная микрофотография наночастиц серебра в составе проводящих чернил

Метод робокастинга заключается в послойном формировании изделия путем экструзии пастообразного материала (в отличие от метода FDM, в котором экструдировается расплав материала). Как правило, вязкость такого материала существенно зависит от напряжения сдвига: при значительном напряжении сдвига вязкость невелика, и материал легко экструдировается из сопла; как только напряжение сдвига уменьшается, вязкость становится больше, поэтому формируемое на платформе изделие продолжает сохранять форму. Затем изделие может подвергаться дополнительной термической обработке, для придания большей механической прочности.

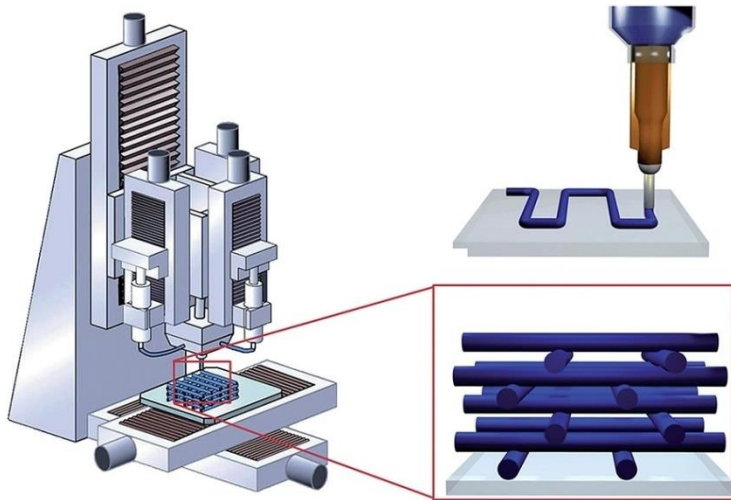


Рисунок 2.4 – Печать проводящего рисунка печатной платы специальными чернилами с высоким содержанием серебра

На данный момент уже существуют установки предназначенные для изготовления многослойных печатных плат технологией 3D-печати.

Аддитивная технология изготовления многослойных печатных плат представляет собой симбиоз трех составляющих: 3D-принтера, предназначенного для печатных плат с двумя печатающими головками; токопроводящих и токонепроводящих чернил; специального программного обеспечения, позволяющего принтеру воспринимать стандартные файлы производства печатных плат и задавать толщину печатаемого слоя (рисунок 2.5).

Изготовление прототипов плат со встроенными компонентами при использовании традиционной технологии является непростой задачей. Основные стадии приведены на рисунке 2.6. Для дискретных компонентов требуется дополнительная операция вырезания лазером окон под компоненты в прокладочной стеклоткани. Эта сложная проблема легко решается на 3D-принтере: во время печати

принтер оставляет окна в слое, затем пользователь устанавливает компоненты, и на следующих проходах принтера они запечатываются новыми слоями.



Рисунок 2.5 – Печать проводящего рисунка печатной платы специальными чернилами с высоким содержанием серебра

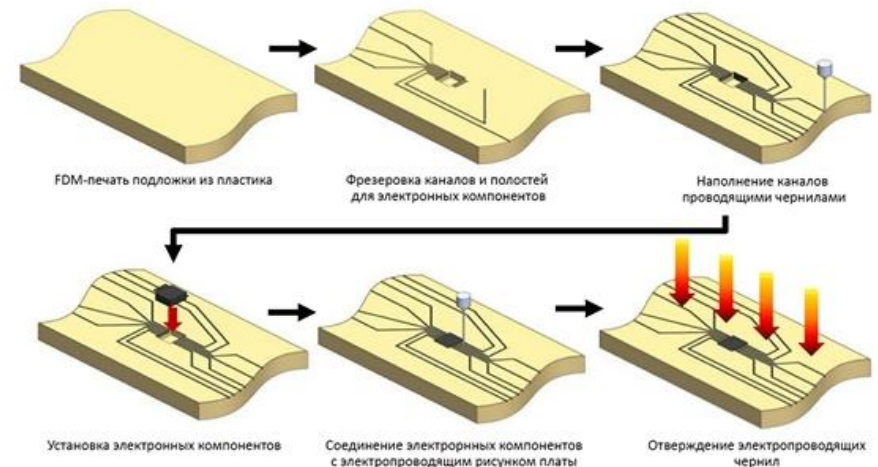


Рисунок 2.6 – Основные стадии производства электронной платы методом 3D-печати

Пример современного 3D-принтера способного печатать многослойные платы изображён на рисунке 7. Основные элементы принтера — это две печатающие головки и две системы отверждения. В принтере DragonFly печатающая головка для нанесения токопроводящих чернил дополнена инфракрасной системой спекания, а для отверждения токонепроводящих чернил используется УФ-система отверждения. Диаметр капли диэлектрика составляет 3 мкм, а токопроводящих чернил — 0,3 мкм,

что позволяет изготавливать прецизионные платы до 5-го класса точности параметром проводник/зазор 100/100 мкм. Минимальная толщина слоя — 10 мкм, а максимальная — 3 мм, поэтому количество слоев, можно сказать, не ограничено. На DragonFly можно печатать платы, содержащие сквозные металлизированные отверстия диаметрами от 0,4 мм и выше, а заполненные токопроводящей пастой отверстия имеют диаметр от 0,2 мм и выше.

Также на принтере можно делать сквозные металлизированные, сквозные неметаллизированные, глухие и даже скрытые отверстия, давая возможность разработчикам максимально просто и быстро тестировать прототипы плат послойного наращивания. Максимальный габаритный размер печатной платы, изготавливаемой на принтере, составляет 200\*200\*3 мм, причем плата не обязательно должна быть плоской. Применение аддитивной технологии позволяет изготавливать многослойные 3D-MID-изделия.



Рисунок 2.7 – Nano Dimension Dragonfly 2020, 3D-принтер профессионального уровня, предназначенный для аддитивного производства печатных плат

Применяемый диэлектрик по электрическим параметрам и основным механическим характеристикам близок FR-4, а проводимость токопроводящих чернил на текущий момент немногим более чем вдвое уступает меди. Диэлектрическая проницаемость применяемого полимера равна 3,2 при 1 МГц и 2,9 при 1 ГГц. Основное текущее ограничение материала — максимальная температура пайки, которая составляет 140 градусов.

Компания Optomes получила грант концерна NextFlex в размере \$3,1 млн на реализацию проекта по аддитивному производству гибкой гибридной электроники, пример изображен на рисунке 2.8.. Партнерами компании выступают другие члены организации – а также Бингемтонский университет и Университет штата Мэриленд.

Проект, официально именуемый «Конформная печать проводящих и диэлектрических материалов на сложных трехмерных поверхностях», станет одним из пяти направлений исследовательской программы с бюджетом в \$45 млн, направленной на развитие промышленного производства гибкой электроники.

Основным оборудованием послужат две системы Pilot Line, основанные на фирменных 3D-принтерах Optomes, работающих по технологии аэрозольного напыления. Пятиосевые установки позволяют печатать фотополимерами и различными чернилами с разрешением в 10 микрон, подстраиваясь под топологию геометрически сложных субстратов.

Наблюдается огромный интерес к гибкой электронике со стороны промышленности, академического сообщества и государственных структур. В долгосрочной перспективе легкая, дешевая и эффективная 3D-печатная гибкая электроника должна найти применение в интернете вещей, робототехнике, биомедицине и других направлениях. Первыми же демонстраторами станут опытные антенные структуры, конформные датчики и непланарные схемы, разработанные компаниями.

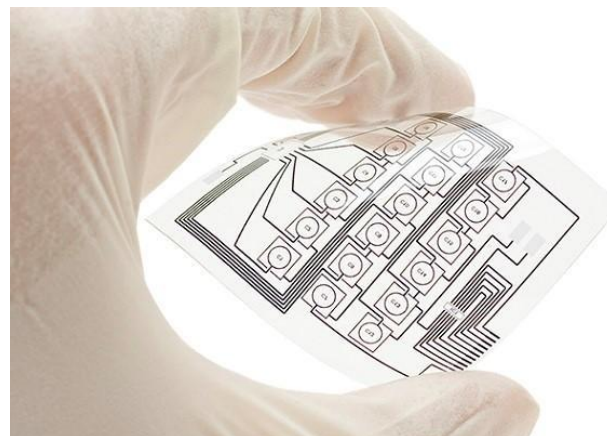


Рисунок 2.8 – Пример гибкой 3D-печатной электроники

Еще одной сферой применения технологии 3D-печати – является изготовление различных корпусов. Примеры даны на рисунках 2.9-2.10.



Рисунок 2.9 – Корпус электронного устройства, изготовленный методом FDM.



Рисунок 2.10 – Корпус электронного устройства, изготовленный методом SLS.

Технология 3D печати предоставляет множество возможностей:

**Массовая кастомизация:** некоторые компании предлагают услуги по пользовательской кастомизации объектов с помощью упрощенного программного обеспечения с последующим созданием уникальных 3D-моделей на заказ. Одним из наиболее популярных направлений стало изготовление корпусов сотовых телефонов.

**Массовое производство:** текущая низкая скорость печати 3D-принтеров ограничивает их использование в массовом производстве. Для борьбы с этим недостатком некоторые FDM устройства оснащаются несколькими экструдерами, позволяющими печатать разными цветами, разными полимерами и даже создавать несколько моделей одновременно. В целом, такой подход повышает производительность, не требуя при этом использования нескольких принтеров – для работы нескольких печатных головок хватает одного микроконтроллера.

**Быстрое прототипирование:** Промышленные 3D-принтеры используются для быстрого прототипирования и исследований с начала 1980-х. Как правило, это достаточно крупногабаритные установки, использующие порошковые металлы,

песчаные смеси, пластики и бумагу. Подобные устройства зачастую применяются университетами и коммерческими компаниями.

В настоящее время ведутся исследования в области 3D-печати силами биотехнологических компаний и академических учреждений. Исследования направлены на изучение возможности применения струйной/капельной 3D-печати в тканевой инженерии для создания искусственных органов. Технология основывается на нанесении слоев живых клеток на гелиевый субстрат или сахарный матрикс, с постепенным послойным наращиванием для создания трехмерных структур, включая сосудистые системы.

### Используемое оборудование и приборы

PRUSA i3 – бюджетный 3D принтер, печатающий FDM метод. Обладает одним экструдером. Внешний вид показан на рисунке 2.11, характеристики принтера приведены в таблице 2.4. Панель управления приведена на рисунке 2.12.

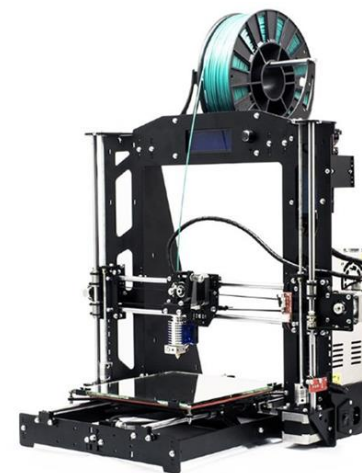


Рисунок 2.11 – Внешний вид 3D-принтера Prusa i3

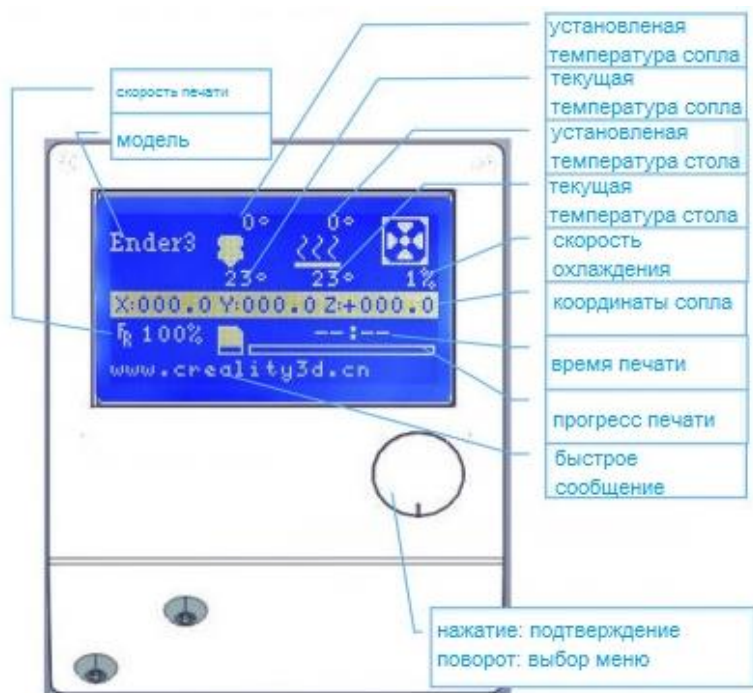


Рисунок 2.12 – Информационный экран 3D-принтера

Таблица 2.4 – Технические данные принтера PRUSA i3

Технология формирования слоев	PJP/FDM/FFF
Количество экструдеров	1
Диаметр сопла	0.4 мм
Рабочий материал	PLA, HIPS,
Минимальная толщина слоя	0.06 мм
Максимальная толщина слоя	0.3 мм
Скорость построения	100 мм/с
Диаметр нити	1.75 мм
Ширина рабочего пространства	215 мм
Глубина рабочего пространства	210 мм
Высота рабочего пространства	180 мм
Интерфейсы	USB, SD

Бинокулярный стереомикроскоп DUET 1030 (рисунок 2.13) предназначен для контроля качества установки элементов на плату. Расстояние между центрами линз должно точно соответствовать расстоянию между зрачками оператора – в противном случае будут проявляться недостаточная четкость изображения, неадекватное световое восприятие и геометрические искажения.

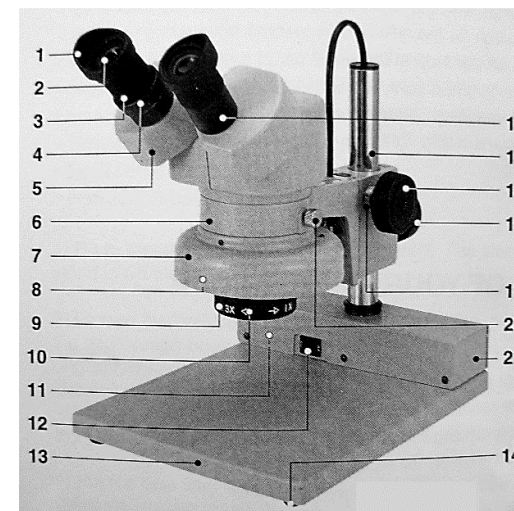


Рисунок 2.13 – Бинокулярный стереомикроскоп DUET 1030

Технические характеристики:

- Кратность .....10× или 30×, фиксированное переключение;
- Лампа подсветки.F Модель .....
- Увеличение (кратность) .....10x или 30x, фиксированное переключение
- Лампа подсветки .....FCL9EX, люминесцентная 230В x 9Вт
- Питание..... Сетевой блок питания
- Поле обзора.....23мм (при 10x) или 7,6мм (при 30x)
- Рабочее расстояние(1).....82,5мм
- Объектив (кратность/фокус).....4x/58мм (трансфокатор)
- Окуляр (кратность/фокус).....DSW10 (10x/23мм)
- Угол схождения окуляров.....12°
- Межзрачковое расстояние.....от 52мм до 75мм, плавная регулировка
- Вертикальная стойка штатива, высота.....303мм

При разрывании модели для контроля прочности осуществляется нормально к поверхности образца на разрывной машине РП 100-1 (рисунок 2.14) при скорости движения нижнего захвата 0,6±0,03 м/мин. Прочность соединения оценивается по величине усилия отрыва, определяемого по шкале разрывной машины с точностью ±0,5 Н, отнесенного к площади отрыва, подсчитанного под микроскопом



Рисунок 2.14 – Машина разрывная для испытания на растяжение РП-100-1

Технические данные РП-100-1

- 1) Наибольшая нагрузка в кгс: 100
- 2) Число поясов на шкале силоизмерителя: 2
- 3) Предельные значения поясов, в кгс:  
 А) 0 – 50                      Б) 0 – 100
- 4) Рабочая часть поясов шкалы, в кгс:  
 А) 5 – 50                      Б) 10 – 100
- 5) Цена деления шкалы на поясе, в кгс:  
 А) 0,1                          Б) 0,2
- 6) Допустимая погрешность показаний нагрузки в пределах рабочей части каждого пояса в % от измеряемой величины:  $\pm 1$
- 7) Скорость движения нижнего (захвата крюка) в мм/мин:  $600 \pm 30$
- 8) Наименьшее расстояние между захватами (крюками) в мм: 470
- 9) Рабочий ход нижнего захвата (крюка) в мм: 200

Лабораторный стенд НТЦ-13.04.5 "Разрывная машина 5кН" (рисунок 2.15) предназначен для проведения статических испытаний прочности материалов на осевое растяжение/сжатие. Разрывная машина имеет ручной привод перемещения активного захвата. Программное обеспечение позволяет проводить испытания образцов по заранее заданным параметрам. Графический вывод экспериментальных зависимостей в режиме реального времени и возможность сохранения результатов эксперимента в отдельный файл для дальнейшей обработки в сторонних приложениях облегчают проведение эксперимента. Характеристики лабораторного стенда приведены в таблице 2.5

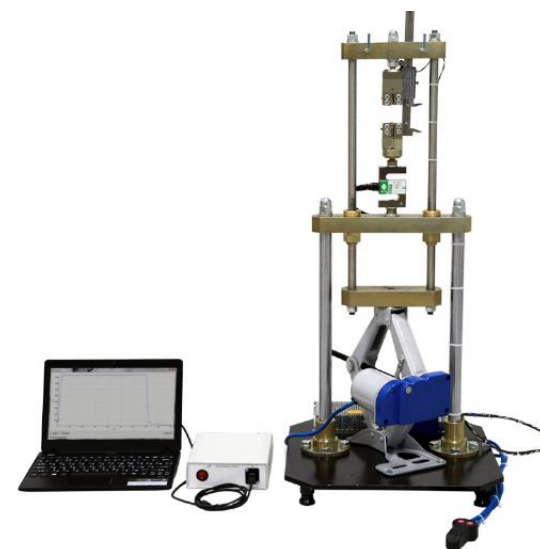


Рисунок 2.15 – Лабораторный стенд НТЦ-13.04.5

Таблица 2.5 – Характеристика лабораторного стенда НТЦ-13.04.5

Питание	~50Гц 220В
Потребляемая мощность, Вт не более	70
Номинальное усилие, развиваемое рабочим органом, Н	5000
Диапазон изменения ширины рабочего пространства, мм	90 - 260
Габаритные размеры установки	
Ширина, мм	500
Высота, мм	1000
Длина, мм	600
Габаритные размеры измерителя деформации, мм, не более:	
Ширина, мм	250
Высота, мм	70
Длина, мм	250
Масса, кг, не более	30

Твердомер ТКС-2М (рисунок 2.17) настольного типа предназначен для измерения твердости металлов и сплавов по методу вдавливания алмазного конуса или стального закаленного шарика под действием заданной нагрузки в течение определенного времени. Прибор по основным параметрам и нормам точности соответствует ГОСТ 12165-66.



Рисунок 2.17 – Твердомер ТКС-2М

#### Технические характеристики:

- Испытательные нагрузки, кгс:
  - предварительная 3
  - общие 15, 30, 45
- Допустимые погрешности нагрузок, %:
  - предварительной  $\pm 2,5$
  - общих  $\pm 0,66$
- Отклонение среднего значения числа твердости, полученного на поверяемом приборе, от средней твердости образцовой меры твердости 2-го разряда МТСП (ГОСТ 9031-63) в единицах твердости, не более:
  - Н 15N  $92 \pm 2 \pm 1,0$
  - Н 30N  $80 \pm 4 \pm 1,0$
  - Н 30N  $45 \pm 5 \pm 2,0$
  - Н 45N  $49 \pm 6 \pm 2,0$
  - Н 30T  $76 \pm 6 \pm 2,0$
  - Н 30T  $45 \pm 5 \pm 3,0$
- Вариации по нагрузкам в пределах допустимой погрешности, %:
  - предварительной 2,5
  - общих 0,66
- Вариации показаний прибора при проверке его образцовыми мерами твердости 2-го разряда МТСП ГОСТ 9031-63, в единицах твердости не более:
  - Н 15N  $92 \pm 2 \pm 1,0$
  - Н 30N  $80 \pm 4 \pm 1,0$

- Н 30N  $45 \pm 5 \pm 2,0$
- Н 45N  $49 \pm 6 \pm 2,0$
- Н 30T  $76 \pm 6 \pm 2,0$
- Н 30T  $45 \pm 5 \pm 3,0$
- Продолжительность цикла проведения испытания, сек 5
- Потребляемая мощность, кВт 0,075
- Наибольшая высота рабочего пространства, мм 200
- Расстояние от центра отпечатка до корпуса, мм 130
- Габаритные размеры, мм.;
  - длина 500
  - ширина 240
  - высота 760

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подать питание на 3D-принтер, включив вилку в розетку.
2. Выйти в главное меню, нажав на кнопку управления. В меню выбрать пункт «Print from SD»
3. Выбрать необходимую модель из списка- нажав на кнопку. Начнется процесс нагрева стола и экструдера. После нагрева начнется печать выбранной модели.
 

*Примечание. Для принтеров данной модели характерна программная ошибка – при первом запуске не происходит нагрев экструдера, для ее решения необходимо выйти в главное меню, выбрать «Stop print», после возвращения экструдера 3D принтера в начальное положение, выбрать модель для печати еще раз, или задать температуру экструдера в ручную, для чего необходимо*

  - Выйти в главное меню.
  - Выбрать пункт «control»
  - Выбрать пункт «temperature»
  - В меню «nozzle»-настроить температуру сопла
  - В меню «Bed»-настроить температуру термостола
4. Исследовать геометрические размеры образцов изготовленные при различных условиях, заполнить таблицу 2.6. Пример образцов изображен на рисунке 2.18.

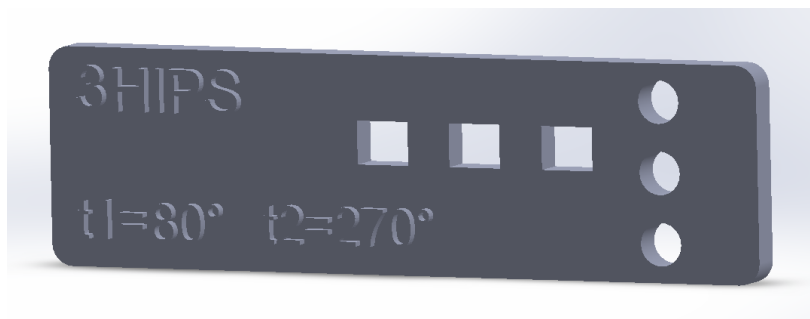


Рисунок 2.18 – Модель для определения геометрических размеров

4.1 Определить толщину образцов в трех точках с помощью микрометра, данные внести в таблицу 2.6.

4.2 Длину и ширину модели измерить с помощью штангенциркуля, данные внести в таблицу 2.6.

4.3 С помощью микроскопа МБС-2 измерить получившиеся при печати модели радиусы скруглений квадратных отверстий. Значения внести в таблицу 2.6.

4.4 С помощью микроскопа МБС-2 измерить радиусы круглых отверстий. Для каждого отверстия произвести измерения 3 раза. Данные внести в таблицу 2.6.

Таблица 2.6 – Параметры моделей изготовленных из материала

Параметр	Размеры модели	Реальные размеры				Отклонение Δ	Усадка, α
		X1	X2	X3	Среднее		
Длина	70 мм						
Ширина	20 мм						
Толщина	3 мм						
R скругл, мм	0						–
R,отв	4 мм						

5. Рассчитайте величины свободной линейной усадки по формуле 2.1 для полученных геометрических размеров модели, и внести данные в таблицу 2.6.

$$\alpha = (l_0 - l) / l_0, \quad (2.1)$$

где  $l$  – соответствующий размер на образце после усадки, мм.

Отклонение линейных размеров относительно номинальных значений рассчитываются по формуле 2.2, данные внести в таблицу 2.6.

$$\Delta = \Delta_{\text{НОМ}} - \Delta_{\text{ИЗМ}}, \quad (2.2)$$

где  $\Delta_{\text{НОМ}}$  – номинальный линейный размер на 3D модели, мм;  
 $\Delta_{\text{ИЗМ}}$  – измеренный линейный размер на тестовом образце, мм

6. Построить диаграмму растяжения, используя лабораторный стенд НТЦ-13.04.5. Примерный вид диаграммы растяжения материала детали изображён на рисунке 2.19.

7. Рассчитайте прочность по формуле 2.3:

$$P = \frac{F}{S} \quad (2.3)$$

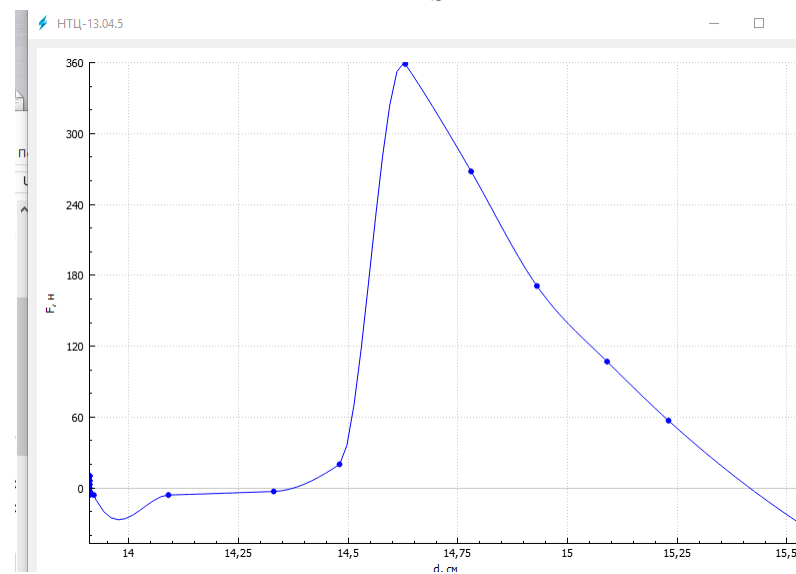


Рисунок 2.19 – Примерный вид диаграммы растяжения материала детали

8. Провести испытание на твердость материала модели с помощью твердомера ТКС-2М. Рассчитать значение микротвёрдости по формуле 2.4.

$$HB = \frac{2F}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} [\text{кгс/мм}^2] \quad (2.4)$$

Где  $F$  – нагрузка, кгс

$D$  – диаметр шарика, мм

D – диаметр отпечатка, мм

## Содержание отчета

1. Внешний вид принтера и его информационная панель.
2. Параметры моделей изготовленных из материала
3. Диаграмма растяжения материала.
4. Расчет прочности и микротвердости.

## Контрольные вопросы

1. Специфика изготовления моделей с помощью 3D принтеров?
2. Методы аддитивного производства
3. Описание метода экструзионной печати
4. Область применения аддитивной печати.
5. Каким образом происходит расчет линейной усадки материала?
6. Каким образом происходит расчет отклонения линейных размеров относительно номинальных?

## Литература

1. Фрайке, Й. *3D-MID*. Материалы технологии, свойства: пер. с англ. Яз.; под ред. И.А. Волкова – СПб.: ЦОП «Профессия», 2014 – 336с.: цв.ил.
2. Кондрашин Л.Л., Лямин А.Н., Слепцов В.В. Современные технологии изготовления трехмерных электронных устройств Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. - 150 с.
3. Тебеньков В.Н. Исследование системы лазерной модификации материалов в технологии 3D MID – СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016 -76с.
4. Смелов В.Г. Исследование точности печати на 3D принтере: методические указания к лабораторной работе / Р.А. Вдовин, В.Г. Смелов. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. - 50 с.