

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Семиглазов В.А.

3D ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

Томск
2023

УДК 004.9
ББК 30.2-5-05
С306

Рецензент:

Курячий М. И., доцент кафедры телевидения и управления ТУСУР, канд. техн. наук

Семиглазов, Вадим Анатольевич

С306 **3D Технологии:** Учебное пособие / Семиглазов В.А. – Томск: гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 192 с.

Целью учебного пособия «3D технологии» является формирование и развитие у студентов технических направлений подготовки практических компетенций в области трехмерных технологий, изучение применяемого оборудования в отрасли, а также специализированного программного обеспечения.

Основными задачами изучения дисциплины являются: овладение студентами технологиями трехмерной печати и сканирования, изучение программного обеспечения для обеспечения процессов сканирования и печати 3D моделей, приобретение студентами практических навыков подготовки моделей для трехмерного сканирования и печати, Приобретение студентами практических навыков постобработки моделей после печати и сканирования.

Одобрено на заседании каф. ТУ протокол № 3 от 15.02.2023

УДК 004.9
ББК 30.2-5-05

© Семиглазов В.А., 2023
© Томск: гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В 3D ТЕХНОЛОГИИ	5
1.1 История появления 3D технологий печати и сканирования	5
1.2 Способы получения цифровых трехмерных моделей	7
1.3 Возможности 3D технологий, области их применений	12
ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ	18
2.1. Экструзионная 3D-печать (FDM/FFF)	18
2.2. Расходные материалы для 3D-печати методом послойного наплавления	25
2.3. Стереолитография (SLA)	42
2.4. Технология многоструйного моделирования (MJM)	45
2.5. Цифровая светодиодная проекция (DLP)	46
2.6. Масочная стереолитография (SGC)	47
2.7. Ламинирование (LOM)	48
2.8. Ламинирование методом селективного осаждения (SDL)	49
2.9. Струйная трехмерная печать (3DP)	50
2.10. Электронно-лучевая плавка (проволочная) (EBF)	52
2.11. Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	53
2.12. Непрямое лазерное спекание металлов (IMLS)	55
2.13. Электронно-лучевая плавка металлов (EBM)	55
2.14. Селективное лазерное плавление (SLM)	57
2.15. Селективное тепловое спекание (SHS)	58
2.16. Селективное лазерное спекание (SLS)	59
ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИИ 3D СКАНИРОВАНИЯ	62
3.1. Времяпролетные сканеры на основе технологии Time-of-Flight	62
3.2. Координатно-измерительные машины (КИМ, СММ)	66
3.3. Оптические 3D-сканеры со структурированным светом	67
3.4. Фотограмметрия	70
3.5. Промышленная компьютерная томография	76
3.6. Ультразвуковое сканирование	77
ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИИ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ	81
4.1. Полигональное моделирование	81
4.2. Сплайновое моделирование	83
4.3. NURBS моделирование	85
4.4. Параметрическое моделирование	89
4.5. Поверхностное моделирование	91
4.6. Твердотельное моделирование	92
4.7. 3D-скульптинг	94
4.8. Промышленное моделирование	96
ГЛАВА 5. ВЫБОР 3D ТЕХНОЛОГИИ	98
5.1. Выбор материала и технологии 3D печати	98
5.1.1. Пластик	98
5.1.2. Фотополимерные материалы	100
5.1.3. Композитный (гипсовый) порошок	101
5.1.4. Воск	103
5.1.5. Металлические порошки	104
5.1.6. Литейный песок	106
5.1.7. Схема выбора подходящего материала для 3D-печати	107
5.2. Выбор 3D принтера	110
5.3. Выбор 3D сканера	123
5.4. Выбор технологии 3D моделирования	131
ГЛАВА 6. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ 3D ТЕХНОЛОГИЙ	142
6.1. Программное обеспечение для 3D печати	142

6.1.1.	Редактирование и ремонт STL-файлов	142
6.1.2.	Программы слайсинга - разделения модели на слои для 3D печати	149
6.1.3.	Управляющие программы	154
6.2	Программное обеспечение 3D сканирования	156
6.2.1.	Программное обеспечение для 3D-сканеров	156
6.2.2.	Программы для фотограмметрического 3D сканирования	165
6.2.3.	Приложения 3D-сканирования для смартфонов	168
6.3	Программное обеспечение для 3D моделирования	173
6.3.1.	Программное обеспечение начального уровня	175
6.3.2.	Программное обеспечение продвинутого уровня	179
6.3.3.	ПО для профессионалов	183
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		185
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		190

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ В 3D ТЕХНОЛОГИИ

1.1 История появления 3D технологий печати и сканирования

Трёхмерная или 3D печать представляет собой послойное создание физического объекта на базе виртуальной трёхмерной модели.

Печать происходит из нескольких сотен и даже тысяч слоев на специальном устройстве - 3D-принтере. 3D-принтером называют устройство вывода трехмерных данных, отличается он от обычного принтера, который выводит двухмерную информацию на лист, тем, что позволяет выводить трехмерную информацию (сразу в трех измерениях) по принципу послойного выращивания физической модели, как правило, снизу-вверх. В свою очередь 3D-печатью называют процесс создания физических объектов из цифровых 3D-моделей, созданных путем трехмерного моделирования в любой САПР или CAD-программе.

Технология трёхмерной печати зародилась в середине XX века, тогда же были выпущены первые 3D принтеры, больше напоминавшие производственные станки, нежели печатающие устройства. Цена таких устройств составляла от нескольких десятков до нескольких сотен тысяч долларов. С развитием технологии трёхмерной печати 3D принтеры становились более компактными и дешёвыми (Рисунок 1.1.). Появились первые устройства, доступные не только для промышленных предприятий и крупных коммерческих организаций, но и для мелких предпринимателей и домашних хозяйств. Материалы для 3D печати могут быть самыми разными от так называемого АВС-пластика до шоколада [1].

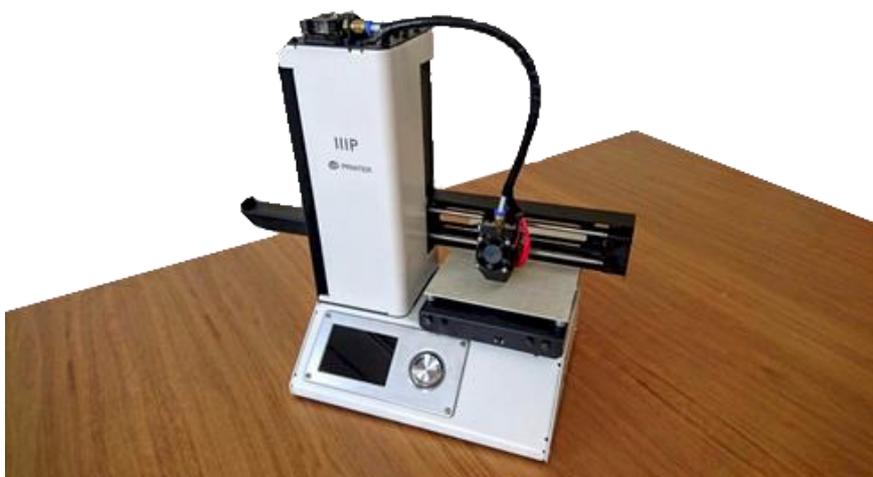


Рисунок 1.1 Современный дешёвый 3D принтер, Monoprice MP Select Mini стоимостью \$199.

Современные трёхмерные печатающие устройства научились создавать не только предметы обихода и одежду, но и собственные детали, продукты питания, человеческие ткани и органы.

3D печать ведёт свою историю с 1984 года, когда американец Чарльз Халл разработал технологию послойного выращивания физических трёхмерных объектов из фотополимеризующейся композиции (ФПК).

Патент на своё изобретение автор получил только в 1986 году, тогда же он основал компанию 3D System и приступил к разработке первого промышленного устройства для трёхмерной печати, которое было представлено общественности год спустя, в 1987 году. Так как термин «3D принтер» ещё не был введён в оборот, аппарат Чарльза Хала получил название «установка для стереолитографии».

Технология 3D печати была достаточно нова в то время, и компания 3D Systems изготовила и поставила первую модель станка нескольким избранным заказчикам. В 1988 г., основываясь на откликах клиентов о станке, компания разработала усовершенствованную

модель 3D принтера SLA-250 и было начато его серийное производство.

В то время как к концу 1988 г. технологии 3D копирования получили широкую популярность, появились новые технологии: моделирование методом наплавления (Fused Deposition Modeling (FDM)) и метод селективного лазерного спекания (Selective Laser Sintering (SLS)). Технология моделирования методом наплавления была изобретена Скотом Крамп в 1988 г. В следующем году им была основана компания Stratasys и налажено промышленное производство станков. В 1992 г. компания продала свой первый станок «3D Modeler». В том же году компания DTM выпустила на рынок станок, работающий по технологии селективного лазерного спекания (SLS). В 1993 г. в Массачусетском технологическом институте (MIT) была изобретена и запатентована еще одна технология 3D печати. Она получила название «Технологии трехмерной печати» и была подобна технологии струйной печати, используемой в 2D принтерах. В 1995г. компания ZCorporation получила от Массачусетского технологического института патент на использование технологии и начала производство 3D принтеров, на базе 3DP технологий.

В 1996 г. были произведены станки «Genisys» от компании Stratasys, «Actua 2100» - от 3D Systems, и «Z402» - Z Corporation. В течение этого времени впервые появился термин «трехмерная печать» для обозначения станков быстрого моделирования. Только в конце 1990-х - начале 2000 гг., в продаже появились несколько моделей станков по относительно низким ценам. В 2005 г. компания Z Corporation выпустила на рынок революционно-новую модель Spectrum Z510 - станок 3D печати с высоким разрешением цветов. Еще один прорыв в области трехмерной печати произошел в 2006 г. с созданием общедоступного проекта RepRap, нацеленного на производство 3D принтера, способного воспроизводить детали собственной конструкции.

Появление технологии 3D-сканирования приходится на последнюю половину 20 века. Первый 3D-сканер увидел свет в 1960 году. Правда, он имел весьма ограниченные возможности, поэтому для получения результата и какой-то точности данных приходилось тратить немало времени и усилий. После 1985 года сканирующие устройства изменились, в них стали использовать источники белого света, лазеры и затемнение для лучшего «захвата» сканируемого объекта.

В 80-х уже появились контактные датчики, которые использовались в 3D-сканерах для оцифровки поверхности твердых несложных объектов, но этот способ был очень медленным, да и результат был далек от идеального. Поэтому разработчики сосредоточились на возможностях оптических технологий, которые вскоре разделились на три типа по зоне «охвата» (Рисунок 1.2):

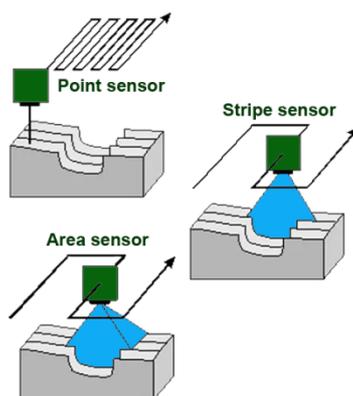


Рисунок 1.2 Типы оптических технологий по зоне охвата сканируемого объекта.

1. точечный, очень медленный способ (point);
2. захват определенной площади поверхности (area);

3. полосной; как выяснилось, самый быстрый метод, так как он использовал множество точек, который полосой проходили по поверхности. Он также обеспечивал и нужную точность сканирования объекта (stripe).

3D-сканирование представляло интерес не только для разработчиков из автомобильных и конструкторских дизайн-бюро, но и для киноиндустрии (отцифровка людей применялась затем в создании образов в анимации). Такие компании как Cyberware Laboratories, Digibotics занялись разработкой своих 3D-сканеров. Например, первая компания создала Head Scanner, который давал относительно неплохую точность и даже мог передавать цвет. А в 1994 году компаний 3D Scanners выпустила 3D-сканер REPLICA, который давал точный (для того времени) и быстрый результат, это стало серьезным успехом.

С тех пор 3D-сканеры были усовершенствованы, они стали точнее, мобильнее, передают цвет. В общем, можно найти 3D-сканер под любую задачу.

1.2 Способы получения цифровых трехмерных моделей

Как уже говорилось ранее, трехмерная (3D) печать заключается в печати объемных трехмерных моделей из нескольких сотен и даже тысяч слоев [2].

Трехмерную модель, которую нужно будет распечатать, можно получить четырьмя способами:

1. скачать готовую модель, например, из интернета;
2. разработать с нуля полноценную трехмерную модель в CAD программе трехмерного моделирования;
3. отсканировать существующий объект сканирующим оборудованием;
4. обработать серию фотографий нужного объекта методами фотограмметрии.

На просторах интернета полно ресурсов, где можно бесплатно скачать модели, созданные другими пользователями [3]. Рассмотрим некоторые из них с большими коллекциями и удобным поиском.

Thingiverse

Пожалуй, самый известный сайт в своей категории — это [Thingiverse](https://www.thingiverse.com) с поистине огромной базой моделей (Рисунок 1.3). Его создала компания Makerbot, которая активно развивает и поддерживает сообщество мейкеров, поэтому «Вселенная штуковин» (вольный перевод названия сайта) весьма на слуху. На сайте можно ставить лайки и комментировать публикации, так что этот ресурс чем-то напоминает социальную сеть. Тут можно наверняка найти то, что искали: от пластиковых деталей для пылесоса до блоков Lego.

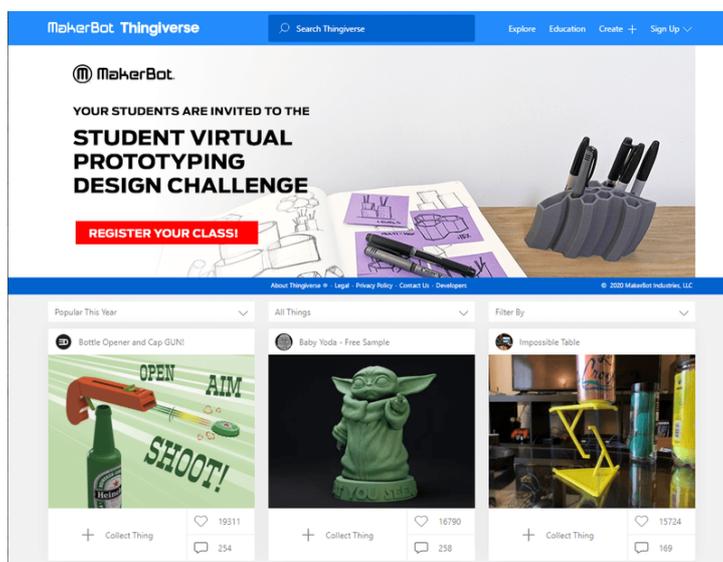


Рисунок 1.3 Главная страница сайта Thingiverse.

3DToday

Отличительная особенность ресурса [3DToday](#) — русскоязычное сообщество энтузиастов 3D-печати (Рисунок 1.4). Помимо моделей на сайте есть раздел с новостями и статьями, из которых можно почерпнуть много интересного о технологиях печати и моделирования. А если что-то непонятно, вы всегда можете задать вопрос в разделе «Вопросы и ответы». Словом, 3DToday не только помогает искать модели, но и несёт просветительскую миссию.

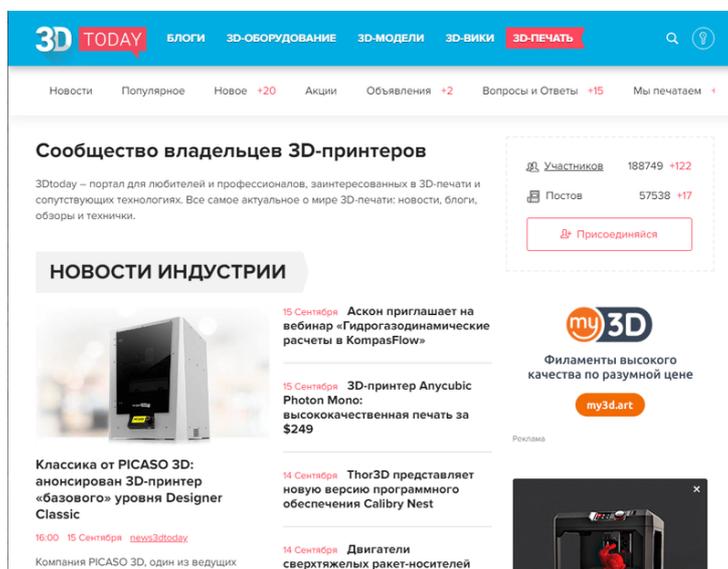


Рисунок 1.4 Главная страница сайта 3DToday.

Instructables

Сайт [Instructables](#) знаменит любительскими DIY-проектами (сделай сам) обширной тематики, которые сгруппированы по направлениям (Рисунок 1.5). Например, в разделе «Workshop / 3D printing» вы найдёте все проекты, так или иначе связанные с печатью на 3D-принтере. Это может быть что угодно: фигурная пластиковая ваза или деталь грандиозного механизма. Поскольку опубликованный проект может не ограничиваться 3D-печатью, порой вам придётся идти в магазин за контроллерами Ардуино, инструментами, краской и другими расходниками для реализации найденного проекта.

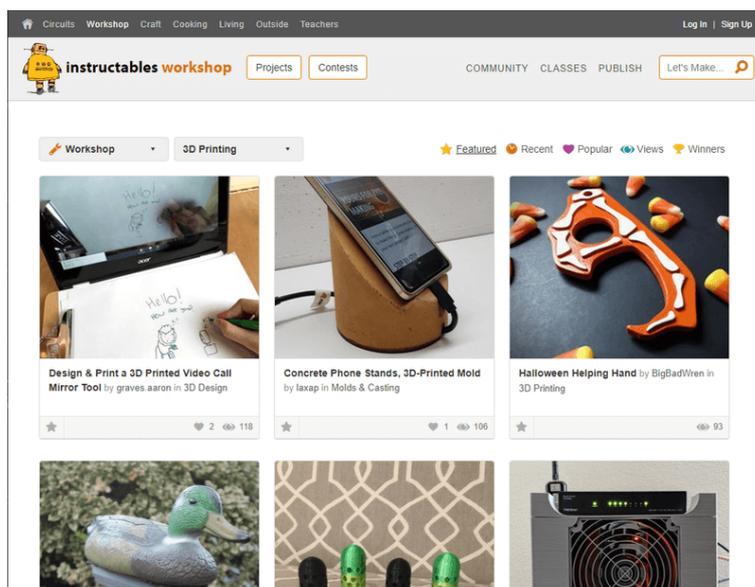


Рисунок 1.5 Главная страница сайта Instructables.

Pinshape

На первый взгляд, ресурс [Pinshape](#) не слишком-то отличается от прочих агрегаторов, но здесь действительно разнообразная коллекция моделей с акцентом на фановые штучки (Рисунок 1.6): игрушки, интерьерные арт элементы. На сайте удобный поиск и навигация.

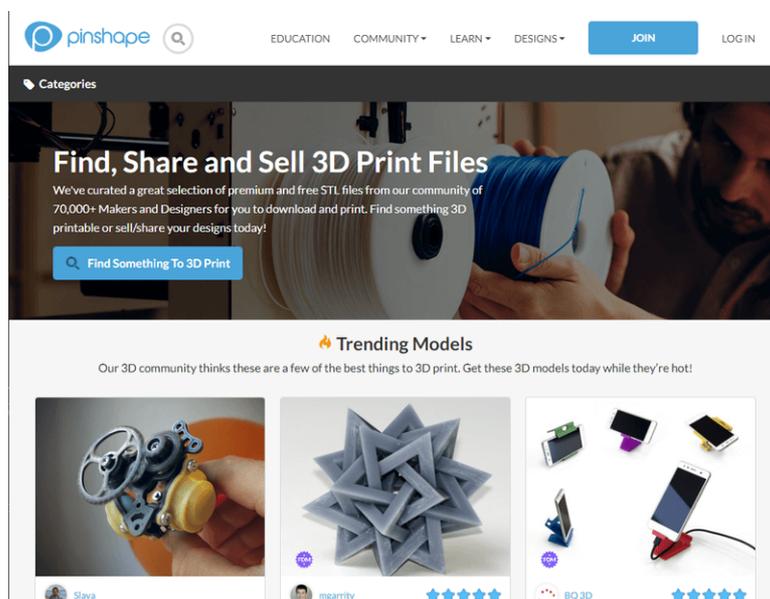


Рисунок 1.6 Главная страница сайта Pinshape.

STLFinder

Сайт [STLFinder](#) —поисковик для 3D-моделей (Рисунок 1.7). Своей базы у него нет, зато он умеет искать готовые модели по ключевым словам на всех крупных сайтах. Таким образом, набирая свой запрос в поисковую строку, вы увидите результаты поиска сразу по нескольким популярным ресурсам и сэкономите время.



Рисунок 1.7 Главная страница сайта STLFinder.

3D-архив NASA

Среди множества сайтов с подборками моделей нашёлся [официальный архив NASA](#) (Рисунок 1.8): сюда инженеры выкладывают 3D-модели космических аппаратов и небесных объектов в формате STL. Можно напечатать себе зонд «Кассини» или астероид Эрос

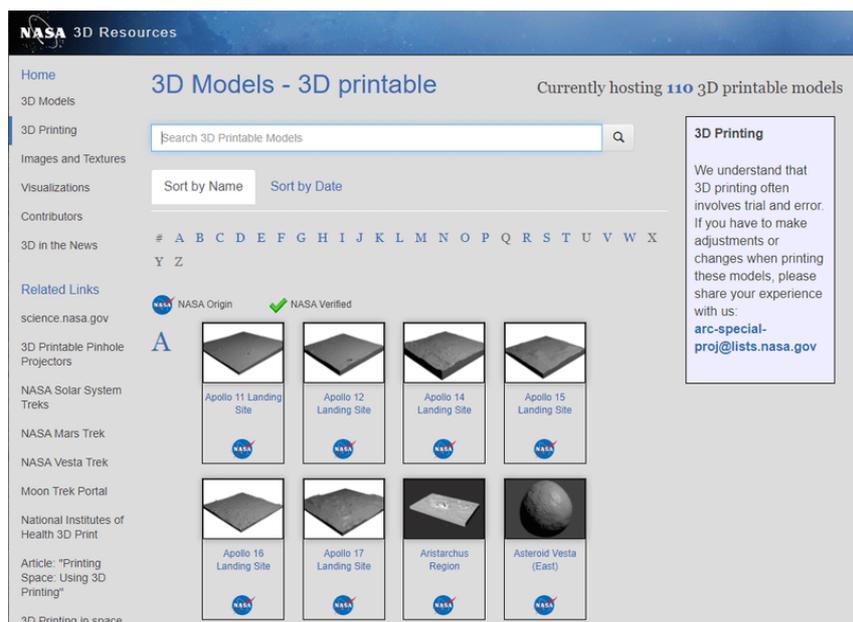


Рисунок 1.8 Главная страница официального архива NASA.

Если стоит задача собрать устройство с нестандартным корпусом или кастомизированной механикой, то искать модель в интернете не имеет смысла и остается единственный путь - создание 3D-модели своими руками в CAD программах.

3D-редакторов очень много, и здесь чётко видна черта между профессиональными пакетами САПР (дорогими и сложными) и любительскими программами (простыми и доступными). Например, популярный редактор Tinkercad даже не надо скачивать на компьютер: эта программа заработает прямо в вашем браузере (Рисунок 1.9). В ней довольно легко проектировать собственные 3D-модели, а разработчики стараются сделать жизнь проще и максимально адаптировать интерфейс для начинающих пользователей.

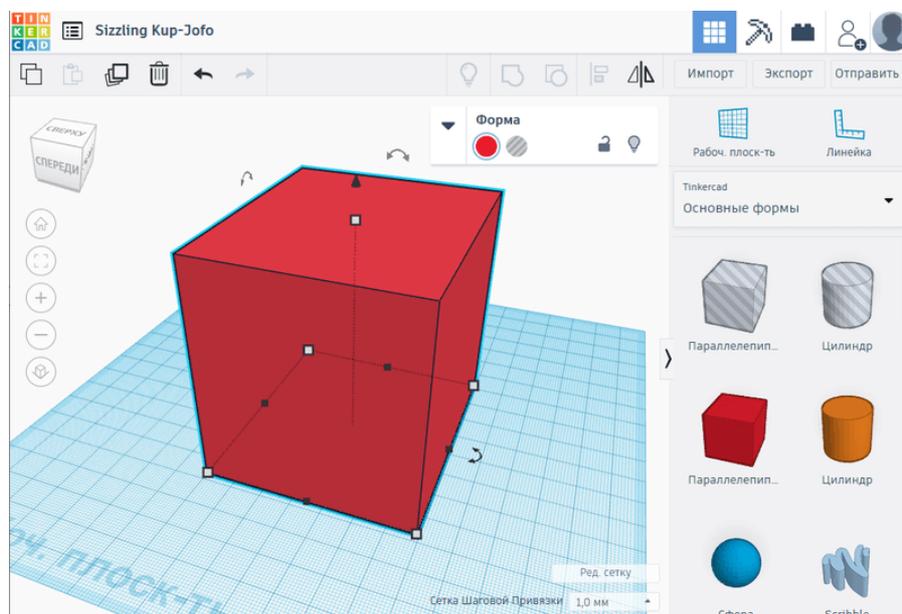


Рисунок 1.9 Популярный 3D редактор Tinkercad.

Более продвинутые САПР по проектированию моделей будут рассмотрены в соответствующем разделе пособия с ПО для 3D моделирования.

Третий способ получения модели - отсканировать объект с помощью 3D сканера,

который представляет собой специальное устройство [2]. 3D сканер анализирует определённый физический объект или же пространство, чтобы получить данные о форме предмета и, по возможности, о его внешнем виде (к примеру, о цвете). Собранные данные в дальнейшем применяются для создания цифровой трехмерной модели этого объекта.

3D сканеры немного похожи на обычные камеры. В частности, у них есть конусообразное поле зрения, и они могут получать информацию только с тех поверхностей, которые не были затемнены. Различия между двумя этими устройствами в том, что камера передаёт только информацию о цвете поверхности, что попала в ее поле зрения, а вот 3D сканер собирает информацию о расстояниях на поверхности, которая также пребывает в его поле зрения. Таким образом «картинка», полученная с помощью 3D сканера, описывает расстояние до поверхности в каждой точке изображения. Это позволяет определить положение каждой точки на картинке сразу в трех плоскостях (x,y,z).

Существует несколько технологий для цифрового сканирования формы и создание 3D модели объекта, в соответствии с которыми 3D сканеры классифицируются на различные типы по принципу работы и области применения (Рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 Современные 3D сканеры.

Существует много разных устройств, которые можно назвать 3D-сканерами. Любое устройство, которое измеряет детали в реальном мире с помощью лазеров, источников света или рентгеновских лучей и генерирует облака точек или полигональные сетки, можно считать 3D-сканером. Они носят разные названия, в том числе 3D-дигитайзеры, лазерные сканеры, сканеры белого света, промышленная КТ (Компьютерная томография), LIDAR и другие. Общим объединяющим фактором всех этих устройств является то, что они фиксируют геометрию физических объектов с сотнями тысяч или миллионами измерений. Их так же можно называть оптическими измерительными машинами.

Данные сканирования собираются компьютером и записываются в качестве точек трехмерного пространства, которые после обработки преобразуются в триангулированную сетку. Затем система автоматизированного проектирования создаёт модель.

Четвертый способ получения модели – это фотограмметрия, научно-техническая дисциплина, занимающаяся определением формы, размеров, положения и иных характеристик объектов по их фотоизображениям.

Существует три основных направления в фотограмметрии [4]:

- создание карт и планов Земли (и других космических объектов) по снимкам (фототопография);
- решение прикладных задач в архитектуре, строительстве, медицине, криминалистике и т. д. (наземная, прикладная фотограмметрия);
- космическая фотограмметрия. Снимки Земли, полученные из космоса, используются для изучения ее природных ресурсов и для контроля за охраной окружающей среды. Снимки других небесных тел, в частности Луны, Венеры, Марса, позволяют изучить их рельеф и получить много другой полезной информации.

Фотограмметрия появилась в середине XIX века, практически одновременно с появлением самой фотографии. Применять фотографии для создания топографических карт впервые предложил французский геодезист Доминик Ф. Араго примерно в 1840 году.

С развитием вычислительной техники и специализированного ПО для обработки изображений, фотограмметрия стала все больше похожа на процесс сканирования, только здесь можно обойтись от дорогого специализированного оборудования, заменив его на обычную фотокамеру или камеру смартфона (Рисунок 1.11).

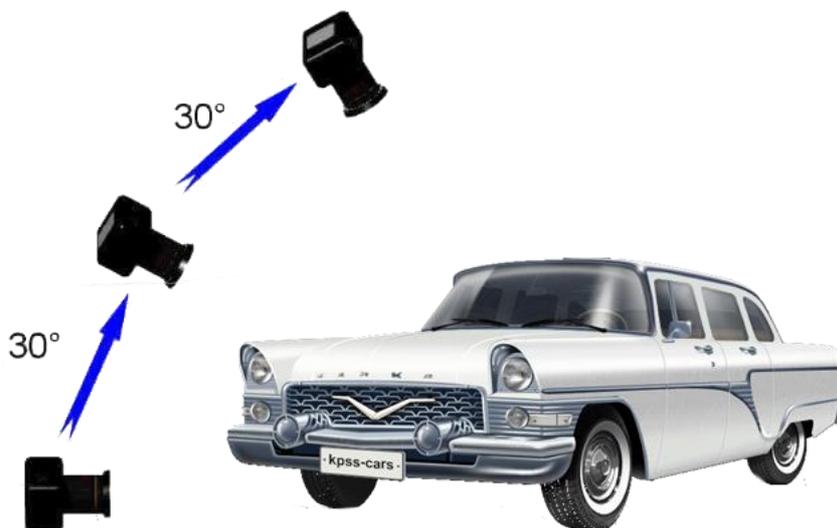


Рисунок 1.11 Фотограмметрия с использованием фотокамеры.

В простейшем случае пространственные координаты точек объекта определяются путём измерений, выполняемых по двум или более фотографиям, снятым из разных положений. При этом на каждом изображении отыскиваются общие точки. Затем луч зрения проводится от местоположения фотоаппарата до точки на объекте. Пересечение этих лучей и определяет расположение точки в пространстве.

1.3 Возможности 3D технологий, области их применений

Возможности 3D печати безграничны. При помощи 3D принтера можно создать самые различные вещи: от обуви до украшений, от пластиковых телефонных чехлов до имплантатов позвоночника, которые создаются из медицинского титана [5].

Одним из основных применений 3D печати в производстве является прототипирование. С помощью аддитивного производства можно сократить время разработки нового продукта и значительно сэкономить средства.

Развитие 3D технологий привело к появлению новых алгоритмов для разработки продукции. Эти алгоритмы легли в основу многих процессов, которые используются в

разных отраслях промышленности.

2008 - Objet Geometries объявила о создании революционной системы быстрого прототипирования Connex500™. Это была первая в мире система, позволяющая производство 3D деталей с использованием различных материалов в одно и то же время.

Ноябрь 2010 - Urbee первый прототип напечатанного автомобиля был представлен. Это первый автомобиль, корпус которого напечатал гигантский 3D принтер. Все внешние компоненты - в том числе прототипы стеклянных панелей - были созданы с помощью Dimension 3D Printers и 3D Systems Fortus.

В 2011 году компания Lockheed продемонстрировала на британском авиашоу в Фарнборо большой беспилотный самолёт, большая часть которого была изготовлена методом трёхмерной печати. Самолёт Polecat - это летающий прототип, призванный показать работоспособность новой технологии 3D печати. К достоинствам такого изготовления деталей относится не только скорость, но и сравнительно низкая стоимость таких деталей, а это - главная цель.

Медицина и стоматология

Медицинский сектор стал одним из первых, где аддитивные технологии нашли свое применение. Медицина имеет огромный потенциал для использования 3D технологий, так как их возможности позволяют значительно улучшить качество жизни людей.

3D печать может использоваться для разных целей. Помимо создания прототипов и разработки новых продуктов, технология 3D печати используется для изготовления литьевых форм, производства инструментов (Рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 3D печать в медицине.

Также 3D печать находит применение при производстве стандартных имплантов и протезов, (например суставов бедра и колена), изготовления индивидуальных ортопедических изделий. На 3D принтерах можно печатать различные хирургические шаблоны, которые значительно облегчают процесс оперативного вмешательства, делают его более точным и простым.

Будущее 3D технологий для медицины заключается в производстве биологических тканей: кожи, органов и костей.

Аэрокосмическая промышленность

Как и медицинский сектор, аэрокосмическая отрасль одной из первых начала внедрять 3D технологии в свою деятельность. В партнерстве с научно-исследовательскими институтами ученые смогли расширить границы использования 3D технологий.

Например, разработка нового самолета стоит больших усилий, при этом каждый объект должен соответствовать определенным требованиям. 3D печать может помочь в этом! Оборудование для аэрокосмической промышленности подвергается тщательным испытаниям. Специальные материалы и техника, созданные для этого сектора

промышленности, полностью готовы к использованию в реальных условиях (Рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 3D печать в аэрокосмической промышленности

Среди компаний, использующих 3D печать в своей работе - Boeing, Rolls-Royce, Airbus, BAE-Systems и другие.

Автомобильная промышленность

Еще одним первооткрывателем аддитивных технологий стал автомобильный сектор промышленности. Многие автомобильные компании, особенно те, которые участвуют в автомобильном спорте, используют 3D печать для разработки прототипов. Также новые технологии позволяют оптимизировать производственные процессы и использовать современные материалы при изготовлении автомобильных деталей (Рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 3D печать в автомобильной промышленности

Ювелирная промышленность

Процесс изготовления ювелирных украшений традиционным способом требовал познаний в разных областях - производство форм для литья, особенности литья разных металлов, гальваника, ковка, резка камня, гравировка и полировка. Освоение каждой из этих дисциплин занимает много лет и требует серьезной практики.

Для ювелирного дела 3D печать стала настоящим открытием. Это простой, быстрый и точный способ создания ювелирных изделий, который позволяет пропустить некоторые

шаги традиционного производства. Кроме того, 3D печать позволяет реализовать любые дизайнерские замыслы (Рисунок 1.15).



Рисунок 1.15 3D печать в ювелирной промышленности

Искусство, дизайн, скульптура

Для искусства 3D технологии открывают новые возможности. Исследование формы и функциональности предметов новыми способами позволяет найти оригинальные решения для современного искусства. Возможности 3D печати позволяют перенимать опыт прославленных мастеров, а также экспериментировать и создавать необычные предметы декора. Некоторые художники, например Джошуа Харкер, Ник Эрвинк и Лайонел Дин прославились только благодаря экспериментам с 3D сканированием, моделированием и печатью (Рисунок 1.16).



Рисунок 1.16 3D печать в дизайне

Благодаря 3D печати и сканированию современные мастера имеют возможность воссоздавать произведения искусства, создавать точные копии памятников культуры и подробно изучать мировые шедевры.

Архитектура, строительство

Многие современные архитектурные компании используют 3D печать для расширения клиентской базы и успешной коммуникации с заказчиками. Компании печатают макеты будущих строений или помогают визуализировать проект, выполненный в программах для

моделирования.

Некоторые архитекторы используют 3D печать непосредственно для строительства. Так появилось соответствующее оборудование и материалы для крупномасштабной 3D печати (Рисунок 1.17).



Рисунок 1.17 3D печать в архитектуре

Мода

Поскольку 3D печать постоянно совершенствуется (в частности в области открытия новых материалов), этой инновацией заинтересовался и модный бизнес. На мировые подиумы вышли аксессуары, напечатанные на 3D принтерах - головные уборы, обувь, сумки и одежда. Новинки демонстрируются на подиумах по всему миру, а производители уже всерьез задумываются над тем, как сделать материалы для 3D печати из доступного и недорогого переработанного сырья (Рисунок 1.18).



Рисунок 1.18 3D печать в моде

Первопроходцем в области развития 3D технологий в этом направлении стала Ирис ван Херпен, которая создала нестандартные коллекции, взорвавшие представления о современной моде.

Еда

3D печать едой - одно из новых направлений, которое воодушевляет людей и может стать настоящим мейнстримом. Этот оригинальный способ приготовления и подачи еды становится все более популярным.

Первоначально для такой печати использовался шоколад и сахар, но сейчас эксперименты продолжаются. Скоро станет возможной печать мяса из белкового материала, а также пасты (Рисунок 1.19).



Рисунок 1.19 3D печать еды

Перспективы развития данной технологии печати позволят сбалансировать рацион на уровне приготовления пищи.

Массовое потребление

В качестве услуги 3D печать набирает большие обороты. 3D печать доступна как для обычных пользователей, так и для компаний, которые не часто прибегают к этому виду производства.

Производители стараются сделать 3D печать более доступной и понятной для пользователей с разным уровнем подготовки. Среди лидеров услуг печати - 3DSystems, Makerbot и Stratasys.

ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ

2.1. Экструзионная 3D-печать (FDM/FFF)

Моделирование методом послойного наплавления (FDM/FFF), или экструзии, было разработано С. Скоттом Трапом в конце 1980-х годов и получило коммерческое распространение в 1990 году силами компании Stratasys, в числе основателей которой числится сам Трамп. В связи с истечением срока действия патента существует большое сообщество разработчиков 3D -принтеров с открытым исходным кодом, а также коммерческих организаций, использующих данную технологию. Как следствие стоимость устройств уменьшилась на два порядка со времени изобретения технологии [1].

Процесс печати методом послойного наплавления подразумевает создание слоев за счет экструзии быстро застывающего материала в виде микрокапель или тонких струй. Экструдер нагревает материал до температуры плавления с последующим выдавливанием расплавленной массы через сопло. Сам экструдер приводится в движение шаговыми двигателями или сервомоторами, обеспечивающими позиционирование печатной головки в трех плоскостях. Перемещение экструдера контролируется производственным программным обеспечением, привязанным к микроконтроллеру.

Общая схема устройства 3D-принтера экструзивного типа представлена на слайде.

Производственный цикл начинается с обработки трехмерной цифровой модели. Модель в формате STL делится на слои и ориентируется наиболее подходящим образом для печати. При необходимости генерируются поддерживающие структуры, необходимые для печати нависающих элементов. Некоторые устройства позволяют использовать разные материалы во время одного производственного цикла. Например, возможна печать модели из одного материала с печатью опор из другого, легкорастворимого, материала, что позволяет с легкостью удалять поддерживающие структуры после завершения процесса печати. Альтернативно возможна печать разными цветами одного и того же вида пластика при создании единой модели. Изделие производится выдавливанием (экструзией) и нанесением микрокапель расплавленного термопластичного полимера с формированием последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования.

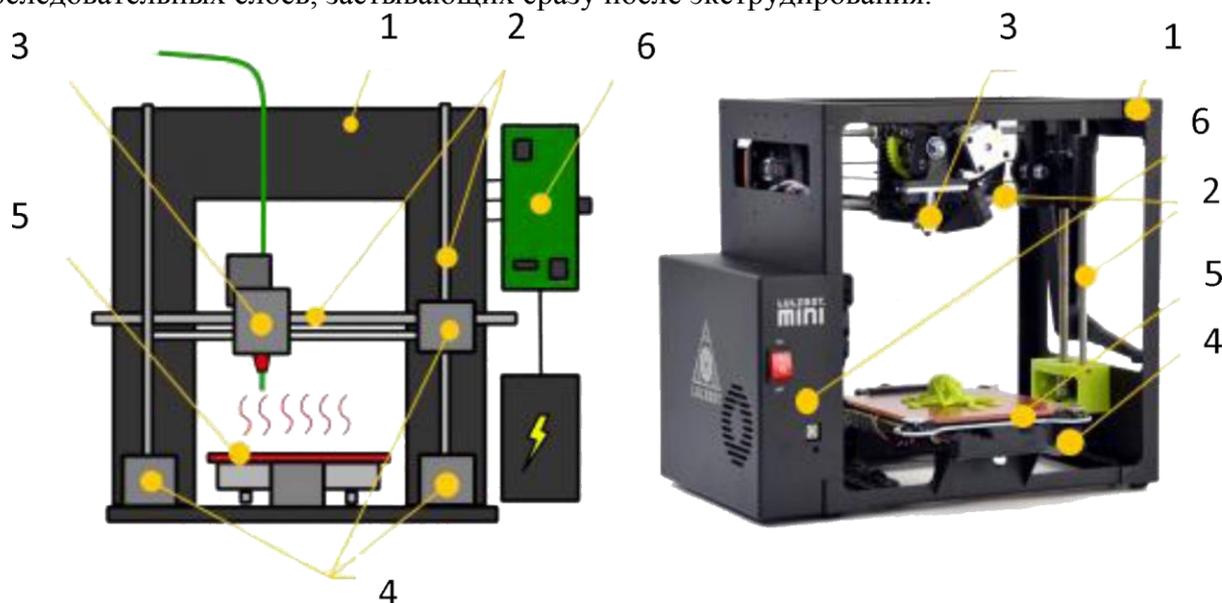


Рисунок 2.1. Схема устройства 3D-принтера экструзивного типа:

1 - корпус, 2 - закрепленные на нем направляющие, 3 - печатающая головка, 4 - шаговые двигатели, 5 - рабочий стол; 6 - управляющая электроника

Пластиковая нить разматывается с катушки и подается в экструдер - устройство,

оснащенное механическим приводом для подачи нити, нагревательным элементом для плавки материала и соплом, через которое осуществляется непосредственно экструзия. Нагревательный элемент служит для нагревания сопла, которое в свою очередь плавит пластиковую нить и подает расплавленный материал на строящуюся модель. Как правило, верхняя часть сопла, наоборот, охлаждается с помощью вентилятора для создания резкого градиента температур, необходимого для обеспечения плавной подачи материала.

Экструдер перемещается в горизонтальной и вертикальной плоскостях под контролем алгоритмов, аналогичных используемым в станках с числовым программным управлением. Сопло перемещается по траектории, заданной системой автоматизированного проектирования (САПР). Модель строится слой за слоем, снизу вверх. Как правило, экструдер (также называемый «печатной головкой») приводится в движение пошаговыми моторами или сервоприводами. Наиболее популярной системой координат, применяемой в технологии FDM, является декартова система, построенная на прямоугольном трехмерном пространстве с осями X, Y и Z. Альтернативой является цилиндрическая система координат, используемая так называемыми дельта-роботами.

Разновидности основных кинематических схем.

Основных частей у любого FDM принтера всего две: стол (он же платформа), на котором крепится печатаемая деталь, и экструдер - узел, из которого подается размягченный материал. Всего, как известно, у трехмерного объекта три оси - X, Y и Z, где Z - традиционно вертикальная. То, как два элемента принтера делят эти три направления, и является принципом работы каждого из видов.

Каждый 3D-принтер имеет собственную кинематическую схему, согласно которой приводятся в движение механические части устройства: платформы и экструдеры. Рассмотрим распространённые кинематические схемы.

Картезианская кинематика

1. Кинематика «Prusa» (пруша).

Пруша (Prusa), также известный как «дрыгостол» - простейшая, компактная недорогая схема, названная в честь своего изобретателя, пожалуй, самая продаваемая разновидность принтеров в бытовом секторе. Стол подвижен в одной горизонтальной оси, как правило, Y, а экструдер движется по остальным двум. За каждое направление отвечает свой двигатель, на некоторых моделях за ось Z абсолютно одновременно работают два.



Плюсы:

- простая конструкция, которую вполне можно собрать самостоятельно,
- невысокая цена комплектующих и самого принтера,
- за процессом печати удобно наблюдать,
- лёгкий доступ к деталям, которым может потребоваться обслуживание

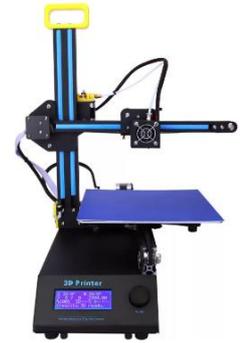
Минусы:

- открытая рабочая камера. Это ухудшает качество печати материалами, которые чувствительны к перепадам температур, а может и вовсе сделать её невозможной. Можно сделать камеру закрытой, собрав кубический колпак, например, из акрила, но это может сильно увеличить общие габариты корпуса принтера,
- инертность, связанная с нагревательным столом 3д принтера. Стол перемещается по оси Y с немалой скоростью, а вместе с ним при печати перемещается и сама модель. В итоге, при печати высоких и тонких моделей на больших скоростях сильно ухудшается качество результата печати. Для того

чтобы получить быстрый качественный результат для моделей с такой геометрией, приходится основательно подходить к настройкам слайсинга.

2. Консольный принтер

Тоже Пруша, только "ополовиненная": вертикальная стойка в наличии всего одна. Из сомнительных преимуществ - чуть меньший габаритный размер по ширине, в остальном все хуже, из-за жёсткости страдают точность и скорость. Может быть использован для демонстрации принципов FDM технологии, так как стол закрыт минимально и весь процесс печати прекрасно виден.



Плюсы:

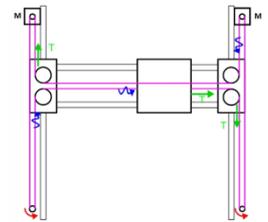
- компактность
- интересный внешний вид

Минусы:

- эту кинематику проблематично использовать для сборки принтера с длиной оси, по которой перемещается печатная голова, более двухсот миллиметров
- принтеру необходимы качественные направляющие и прочная рама

3. H-BOT

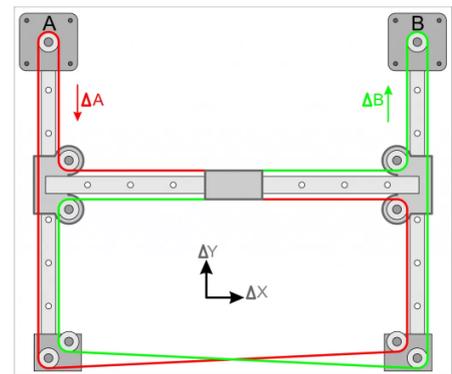
H-Bot - более сложная схема, которой обладают, как правило, принтеры подороже. Стол движется исключительно вверх-вниз, по оси Z. Каретка с экструдером перемещается над столом по осям X и Y при помощи одного ремня и двух согласованно работающих двигателей.



4. Core-XY

CoreXY во многом повторяет H-Bot, но отличается наличием двух зубчатых ремней. Чаще всего профессиональные 3D принтеры компонуются по этим кинематическим схемам.

Из разной схемы установки ремней вытекают основные различия между H-Bot и Core-XY. В H Bot усилия, перемещающие балку оси X по оси Y могут перекосить её, после чего конструкция будет нуждаться в восстановлении. В связи с этим, крепления балки оси X и сам её профиль должны быть качественными, и хорошо продуманными, что в конечном итоге сказывается на затратах при производстве принтера. У Core-XY эта проблема отсутствует. Ещё одно уязвимое место этих кинематик – зубчатые ремни. Из-за своей большой длины, классические ремни GT2-6 могут заметно растянуться за небольшой промежуток рабочего времени, что несомненно скажется на качестве печати и работоспособности принтера. Этот момент больше относится к кинематике H Bot, так как там используется один очень длинный зубчатый ремень, протянутый через всю конструкцию. Однако при масштабировании габаритов всего механизма для увеличения объёма рабочей камеры, в какой-то момент эта проблема может появиться и на Core-XY. Там тоже используются довольно длинные зубчатые ремни, хоть и сильно короче, в сравнении с H Bot. В итоге, при масштабировании таких кинематик стоит уделить особое внимание подбору подходящего зубчатого ремня, для того, чтобы при работе он не провисал и смог прослужить достаточно долгое время.



Плюсы:

- высокая жесткость конструкции
- возможность обеспечить высокоточную качественную печать при приемлемой скорости,
- равномерное качество печати в любом месте рабочего пространства,

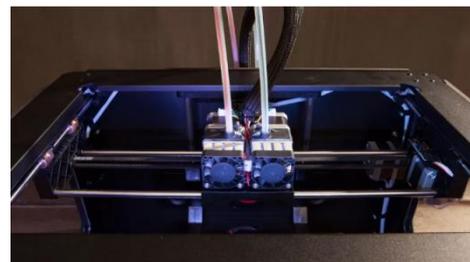
- отсутствие инертности, вызываемой движением стола,
- легче упаковать в защитный кожух и термокамеру.

Минусы:

- размер принтера раза в два-три больше печатаемого объема,
- высокая стоимость,
- сложный ремонт,
- склонность к перекосам каретки (для H-Bot)

5. Кинематика «Makerbot»

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



Плюсы:

- зубчатые ремни, использующиеся в конструкции, не имеют большую длину и не склонны к растяжению
- хорошее качество результатов 3д печати при довольно высокой скорости
- такую кинематику легко собрать в закрытый корпус, чтобы печатать филаментами, чувствительными к перепадам температур
- хорошая масштабируемость благодаря сравнительно коротким зубчатым ремням

Минусы:

- шаговый двигатель оси X путешествует вместе с печатающей головой по оси Y, из-за чего каретка приобретает дополнительный вес
- шаговый двигатель располагается с краю от направляющих оси X, из-за чего конструкция этой оси получает смещение центра масс в одну из сторон, что может сказаться на качестве печати.

6. Кинематика «Ultimaker»

Ещё одна кинематика, в которой стол перемещается вертикально, а печатающая голова в двух осях, X и Y. Её основное отличие – направляющие валы, расположенные перпендикулярно друг к другу и проходящие сквозь каретку хотэнда или экструдера. Эти валы должны быть по возможности максимально ровными. От этого напрямую зависит как работоспособность принтера, так и качество его печати. Также, особое внимание в этой кинематике нужно уделить и подшипникам скольжения. Обычно в качестве подшипников используют втулки. Управление перемещениями по осям X и Y разделено. Двигатели установлены на корпус принтера и не усложняют перемещение своим весом. Для каждой оси отдельно используется свой шаговый двигатель и отдельные зубчатые ремни, часто замкнутые. Непосредственно к печатающей голове ремни здесь присоединять не придётся.



Плюсы:

- короткие зубчатые ремни
- легко установить закрытый корпус
- шаговые двигатели расположены на корпусе

- малый вес печатной головы, высокая скорость перемещения
- хорошее качество печати

Минусы:

- Очень высокие требования к качеству направляющих валов и подшипников
- Плохая масштабируемость, связанная с первым минусом

7. Core-XYZ

Кинематика, напоминающая Core-XY, но ещё более сложная, по сравнению с ней. Здесь экструдер может перемещаться во всех трёх осях, а стол неподвижно закреплён в нижней части конструкции. В домашних DIY вариантах таких принтеров перемещения по всем осям контролируются зубчатыми ремнями. Каждый зубчатый ремень протягивается через все три оси. Принтер с такой кинематикой непросто собрать, зато, за процессом печати в нём очень интересно наблюдать. Печатаемая модель остаётся абсолютно неподвижной на протяжении всего процесса печати, как в Дельта-принтерах, которые мы обсудим немного позже, при этом Core-XYZ позволяет избежать минусов дельта-кинематики.



избежать минусов дельта-

Плюсы:

- Жёсткая конструкция
- Высокая точность
- Модель при печати остаётся абсолютно неподвижна
- Лёгкая установка закрытой камеры
- завораживающий внешний вид процесса печати

Минусы:

- Очень сложный процесс сборки, большое количество составляющих частей
- Повышенные требования к электронике и качеству деталей механической составляющей принтера
- Сложная масштабируемость из-за длинных зубчатых ремней

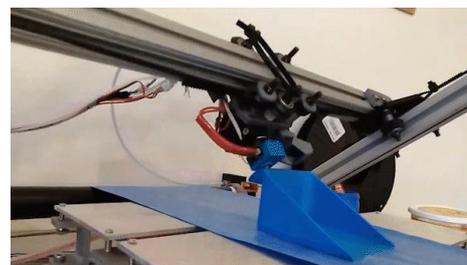
8. IDEX

Приставку IDEX используют для принтеров, имеющих два экструдера, которые передвигаются по оси X независимо друг от друга. Эти перемещения возможны благодаря двум независимым шаговым двигателям, каждый из которых соединён с одной из печатных голов своим зубчатым ремнём. Такая модификация позволяет поочередно печатать двумя пластиками одну деталь или две одинаковые (или симметричные) детали одновременно.



9. Конвейерный тип

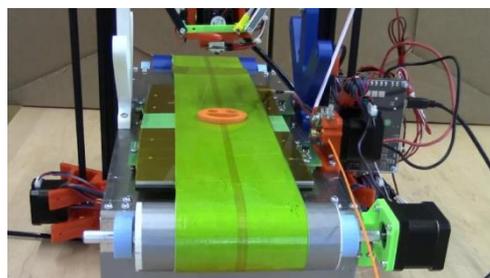
Конвейерный принтер. Еще одна интересная модификация 3д принтера. По сути, она имеет две разновидности. Первая разновидность является, скорее, отдельной полноценной кинематикой, сначала разберём её.



Отличия два: первое конструкционное - стол выполнен в виде закольцованной ленты, наподобие тех, что используются в беговых дорожках, и одно это позволяет расширить рабочую область по оси Y на очень большое расстояние, теоретически хоть до бесконечности. Второе отличие принципиальное - ось Z должна быть расположена не традиционно вертикально, а под углом

к оси движения стола. Такая компоновка позволяет печатать изделия любой длины за один проход, не “дрыгая” столом. Технология довольно интересная и имеет особые преимущества, а именно – печать объектов, превосходящих по длине размер принтера, а также возможность удобной автоматизации серийной 3д печати.

Вторая разновидность – это просто установка конвейерного стола вместо классического. Эта вариация проще, и не позволяет печатать «бесконечные» по длине объекты, зато её можно установить практически на любую кинематику принтера, и запускать на печать поочерёдно нужное количество объектов. А снятием детали со стола займётся конвейер.



Дельта-кинематика

Дельта принципиально отличается от предыдущих, которые выполнены по классической декартовой механической схеме: три измерения - три оси. У дельты все три оси одновременно отвечают за положение печатающей головки в пространстве, что вычисляется по хитрой формуле. Отличается даже стол, он у дельты абсолютно неподвижен и практически всегда имеет круглую форму. При такой компоновке все тяжелые компоненты остаются на корпусе принтера, и печатная голова должна быть лёгкой и малоинертной. Благодаря длинным рычагам даже небольшое движение на одной из осей принтера вызывает кратное смещение экструдера. Все это позволяет развивать дельте самые большие скорости печати из всех FDM принтеров. И еще Дельта, пожалуй, самый компактный принтер в горизонтальной проекции, на столе занимает минимум места, чуть больше печатной области, весь основной объем, включая катушку с пластиком, уходит вверх, что очень удобно для небольших помещений и позволяет без труда устанавливать его в шкафах и подобных “термокамерах”. Впрочем, приобрести или сделать компактную камеру прямо на корпусе принтера тоже не сложно. Ограничивает печатаемый предмет в размерах X-Y, но очень хорош для создания высоких объектов.



Плюсы:

- самая высокая скорость печати,
- неплохое качество, которое, правда, сильно зависит от жесткости корпуса,
- шикарно выглядит, невероятно красив в процессе печати.

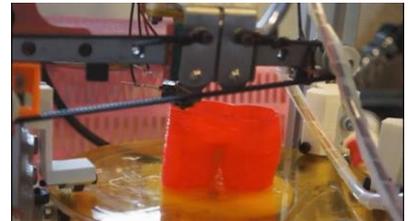
Минусы:

- на бюджетных моделях качество и разрешение печати падает от центра стола к краям,
- сложно отрегулировать нулевой уровень стола, для этого принтер делает многочисленные измерения по всей поверхности и хранит их в памяти, но малейший люфт или смещение в геометрии обесценивает эти данные и заставляет проводить измерения сначала,
- сложная конструкция, которая очень требовательна к качеству комплектующих, из которых собирается механическая составляющая,
- сложен в ремонте.

Полярная кинематика

Полярный 3D принтер. Как следует из названия, главное отличие в замене декартовых координат на полярные в горизонтальной плоскости. Варианта два: берем Прушу и заставляем стол двигаться не туда-сюда по оси Y, а вращаться вокруг собственной оси. Технология интересная, но достаточно специфичная. Да, таким образом можно напечатать

любой трехмерный объект, но заметное падение точности от центра к краям стола не даст насладиться безупречным качеством изделия. Использовать такую кинематическую схему имеет смысл для создания тел вращения, например ваз, кружек, уплотнителей и прочих около-цилиндрических и сферических поверхностей.



Второй вариант: принтер стоит в центре окружности и печатает объект вокруг себя вращаясь и поднимаясь с каждым слоем. В реальности так устроен строительный принтер, печатающий дома бетоном вместо пластика. Благодаря полярной схеме печати, устройство максимально компактно и мобильно. Вообще, идея строительных 3D принтеров очень интересна и перспективна, но это тема отдельной статьи.



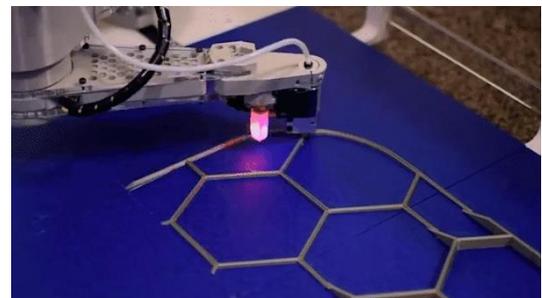
Роботизированные манипуляторы

Принтер-манипулятор. Промышленные манипуляторы весьма многофункциональны и точны. И естественно, инженеры уже не раз фиксировали в их руке экструдер и учили выводить им правильные кривые. Печать с манипулятора может вестись как традиционно послойно, так и подобно 3D-ручке - вытягивать линии прямо в воздухе между заданными точками, что, конечно, уже не является классической печатью FDM. Пока что такой способ производства моделей находится в стадии разработки и служит больше для забавы и демонстрации возможностей манипуляторов, и они действительно достойны восхищения.



SCARA

SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm) – это кинематика, которая основана на перемещение экструдера в горизонтальной плоскости (X и Y) за счет сочленения рычажного механизма. Перемещение экструдера вверх-вниз (вдоль оси Z) вместе с этим механизмом по вертикальной направляющей.



Такие приборы обладают высокой точностью и повторяемостью, при работе издают минимум шума и вибраций. SCARA по детализации печати превзошли и картезианские модели: разница еще и в том, что первые работают ощутимо быстрее. Такая кинематика обычно используется в роботах, которые применяются в автоматизированном или полуавтоматизированном производстве, и, соответственно, к ним применяются особо высокие требования по надёжности и долговечности. Такие роботы должны выдерживать многочасовые рабочие смены, и стоят они, соответственно, недешево.

Плюсы:

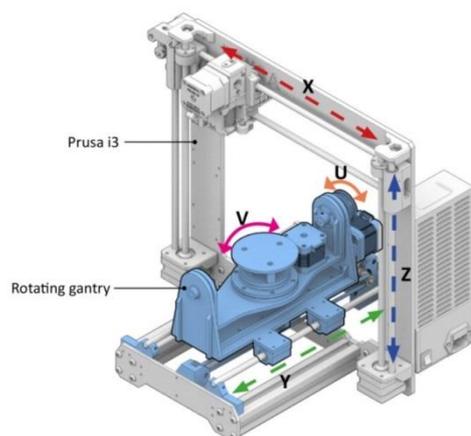
- точность печати;
- высокая скорость печати;
- небольшие габариты и масса.

Минусы:

- ограничения по жесткости в зоне осей X и Y;
- высокая стоимость;
- не самая широкая сфера использования.

Пятиосевые принтеры

Пяти осевые, или 5д принтеры — это отдельный класс профессионального оборудования. Благодаря дополнительным осям, в которых можно перемещать модель в процессе печати, появляется ряд преимуществ, которые могут быть полезны как для изготовления инженерной продукции, так и для создания интересных дизайнерских и художественных решений. В большинстве случаев, кинематика пятиосевых принтеров делится на два блока: первый блок перемещает печатающую голову, которая имеет две оси свободы, как во многих картезианских кинематиках, А второй блок перемещается печатный стол принтера, у которого, помимо перемещения по оси Z, появляется одна ось вращения вокруг своей оси, расположенная перпендикулярно поверхности стола, и вторая ось вращения, расположенная параллельно поверхности стола, которая позволяет наклонять стол на нужное количество градусов.



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

Как наиболее распространённый и коммерчески доступный способ трехмерной печати, метод послойного наплавления обладает самым широким спектром расходных материалов (филаментов). В качестве расходных материалов для экструзионной печати используются различные виды полимеров, включая акрилонитрил-бутадиен-стирол (АБС-пластик), поликарбонат (ПК), полилактид (полимолочная кислота, ПЛА), полиэтилен высокого и низкого давления (ПЭВД, ПЭНП), смеси поликарбоната и АБС-пластика, полифениленсульфон и др. Как правило, полимер поставляется в форме наполнителя, изготовленного из чистого пластика.

В сообществе энтузиастов 3D-печати существует несколько проектов, направленных на переработку использованного пластика в материалы для 3D-печати. Проекты основаны на выработке расходных материалов с помощью шредеров и переплавляющих устройств.

Технология послойного наплавления имеет определенные ограничения по сложности создаваемых геометрических форм. Например, создание навесных конструкций (таких, как сталактиты) невозможно само по себе ввиду отсутствия необходимой поддержки. Это ограничение компенсируется созданием временных опорных конструкций, удаляемых по завершении печати. Главным же достоинством данной технологии является ее доступность: чтобы собрать экструзионный 3D-принтер в домашних условиях потребуется вложить всего 30–40 тысяч рублей.

2.2. Расходные материалы для 3D-печати методом послойного наплавления

Полилактид (полимолочная кислота, **ПЛА**, polylactic acid, **PLA**) - один из наиболее широко используемых в 3D-печати полимеров. Это биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир (Рисунок 2.2), мономером которого является молочная кислота [1].

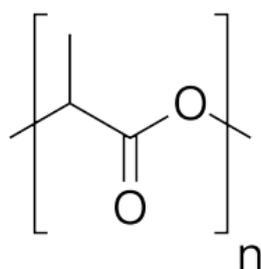


Рисунок 2.2. Химическая формула полилактида

Сырьем для производства служат ежегодно возобновляемые ресурсы, такие, как кукуруза и сахарный тростник. Используется для производства изделий с коротким сроком службы (пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара), а также в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов.

Распространённость полилактида в аддитивном производстве обуславливается сразу двумя факторами. Во-первых, полилактид полностью безопасен для окружающей среды. Во-вторых, поскольку он является полимером молочной кислоты, полилактид полностью биоразлагаем.

В то же время способностью полилактида к биоразложению обуславливается его недолговечность. Пластик легко впитывает воду и относительно мягок. Как правило, модели из ПЛА не предназначаются для функционального использования, а служат в качестве дизайнерских моделей, сувениров и игрушек. Среди немногих практических промышленных применений полилактида можно отметить производство упаковки для пищевых продуктов, контейнеров для лекарственных препаратов и хирургических нитей, а также использование в подшипниках, не несущих высокой механической нагрузки (например, в моделировании), что возможно благодаря отличному коэффициенту скольжения материала.

Одним из наиболее важных преимуществ применения ПЛА в 3D-печати служит низкая температура плавления - всего 170-180 °С, что способствует относительно низкому расходу электроэнергии и возможности использования недорогих сопел из латуни и алюминия. Температура плавления материала зависит от степени его кристалличности и может варьироваться в широких пределах. Как правило, экструзия проводится при 160-170 °С. В то же время полилактид достаточно медленно застывает (температура стеклования составляет около 50 °С), что следует учитывать при выборе 3D принтера. Оптимальным вариантом является устройство с корпусом открытого типа, подогреваемой рабочей платформой (во избежание деформаций моделей большого размера) и, желательно, дополнительными вентиляторами для охлаждения свежих слоев модели.

Полилактид характеризуется низкой усадкой, т. е. потерей объема при охлаждении, что способствует предотвращению деформаций. Тем не менее, усадка имеет кумулятивный эффект при увеличении габаритов печатаемых моделей. В последнем случае может потребоваться подогрев рабочей платформы для равномерного охлаждения печатаемых объектов.

Плотность ПЛА варьируется от 1200 до 1400 кг/м³. Стоимость полилактида относительно невелика, что добавляет популярности этому материалу. Усредненные эксплуатационные характеристики полилактида представлены в таблице 2.1

Таблица 2.1 Эксплуатационные характеристики полилактида

Показатель	Значение
Температура плавления, °С	170-180
Температура размягчения, °С	50
Твердость (по Роквеллу), R	70-90
Относительное удлинение при разрыве, %	3,8
Прочность при изгибе, МПа	55,3

Прочность на разрыве, МПа	57,8
Модуль упругости при растяжении, ГПа	3,3
Модуль упругости при изгибе, ГПа	2,3
Температура стеклования, °С	60-65
Плотность, г/см ³	1,23-1,38
Минимальная толщина стенок, мм	1
Точность печати, %	± 0,1
Размер мельчайших деталей, мм	0,3
Усадка при изготовлении изделий,	-
Водопоглощение, %	0,5-50

АБС-пластик (акрилонитрил-бутадиен-стирол, **ABS**) - на сегодняшний день это самый популярный полимер из используемых в 3D-печати. АБС-пластик - это ударопрочный термопластичный полимер, полученный сополимеризацией акрилонитрила с бутадиеном и стиролом (название пластика образовано из начальных букв наименований мономеров). Пропорции этих компонентов (Рисунок 2.3) в составе АБС-пластика могут варьироваться в пределах 15—35 % для акрилонитрила, 5—30 % для бутадиена и 40—60 % для стирола.

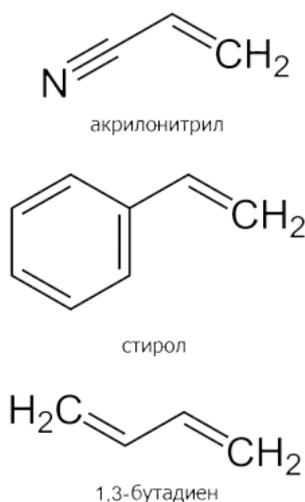


Рисунок 2.3. Мономеры для синтеза АБС-пластика

Широкое распространение АБС-пластика обуславливается отличными механическими свойствами (табл. 2.2), долговечностью и низкой стоимостью этого материала. АБС-пластик получил широкое применение в промышленности. Он применяется для изготовления:

- деталей автомобилей (приборных щитков, элементов ручного управления, радиаторной решётки);
- корпусов крупной бытовой техники, радио- и телеаппаратуры, деталей электроосветительных и электронных приборов, пылесосов, кофеварок;
- пультов управления;
- телефонов, факсовых аппаратов, компьютеров, мониторов, принтеров, калькуляторов, другой бытовой и оргтехники;
- корпусов промышленных аккумуляторов;
- спортивного инвентаря;
- деталей оружия;
- мебели (Рисунок 2.4);
- сантехники;
- выключателей и тумблеров;
- канцелярских изделий;

- музыкальных инструментов;
- игрушек и детских конструкторов;
- чемоданов и контейнеров;
- деталей медицинского оборудования и медицинских принадлежностей;
- смарт-карт.

Кроме того, АБС-пластик применяется как добавка, повышающая теплостойкость и улучшающая перерабатываемость композиционных материалов на основе поливинилхлорида (ПВХ), как добавка, повышающая ударную вязкость полистирола, а также как добавка снижающая цену поликарбонатов.

Таблица 2.2 Свойства АБС-пластиков для 3D-печати

Показатель	Значение
Температура стеклования, °С	~ 105
Прочность на изгиб, МПа	41
Предел прочности на разрыв, МПа	22
Модуль упругости при растяжении, МПа	1627
Относительное удлинение, %	6
Усадка при охлаждении, %	До 0,8
Плотность материала, г/см ³	~ 1,05

АБС-пластик устойчив к влаге, кислотам и маслу, имеет достаточно высокие показатели термостойкости - от 90 °С до 110 °С. К сожалению, некоторые виды материала разрушаются под воздействием прямого солнечного света, что несколько ограничивает применение. В то же время АБС-пластик легко поддается окраске, что позволяет наносить защитные покрытия на немеханические элементы.



Рисунок 2.4. Стулья из АБС-пластика

Несмотря на относительно высокую температуру стеклования (около 100 °С), АБС-пластик имеет относительно невысокую температуру плавления. Ввиду аморфности материала АБС-пластик не имеет точки плавления как таковой, но приемлемой для экструзии считается температура в пределах 180-200 °С (примерно на одном уровне с полилактидом). Низкий интервал между температурами экструзии и стеклования способствует более быстрому застыванию АБС- пластика по сравнению с полилактидом.

Основным минусом АБС-пластика можно считать высокую степень усадки при охлаждении - материал может потерять до 0,8 % объема. Этот эффект может привести к значительным деформациям модели, закручиванию первых слоев и растрескиванию. Для борьбы с этими неприятными явлениями используются два основных решения. Во-первых, применяются подогреваемые рабочие платформы, способствующие снижению градиента температур между нижними и верхними слоями модели. Во-вторых, 3D-принтеры для печати АБС- пластиком зачастую используют закрытые корпуса и регулировку фоновой

температуры рабочей камеры. Это позволяет поддерживать температуру нанесенных слоев на отметке чуть ниже порога стеклования, снижая степень усадки. Полное охлаждение проводится после получения готовой модели.

Относительно низкая «липучесть» АБС-пластика может потребовать дополнительных средств для схватывания с рабочей поверхностью, таких, как клейкая лента, полиимидная пленка или нанесение раствора АБС-пластика в ацетоне на платформу непосредственно перед печатью.

В то время как при комнатной температуре АБС-пластик не представляет угрозы здоровью, при нагревании пластика выделяются пары акрилонитрила - ядовитого соединения, способного вызвать раздражение слизистых оболочек и отравление. Хотя объемы производимого акрилонитрата при маломасштабной печати незначительны, рекомендуется печатать в хорошо проветриваемых помещениях или предусмотреть вытяжку. Не рекомендуется использовать АБС-пластик для производства пищевых контейнеров и посуды (особенно для хранения горячей пищи или алкогольных напитков) или игрушек для маленьких детей.

Хорошая растворимость АБС-пластика в ацетоне весьма полезна, так как позволяет производить большие модели по частям с последующим склеиванием, что значительно расширяет возможности недорогих настольных принтеров.

Некоторые виды АБС-пластики могут разрушаться под воздействием солнечного света.

Поливиниловый спирт (ПВС, poly(vinyl alcohol, PVA, PVAI) - искусственный, водорастворимый, термопластичный полимер (рисунок 2.5). Синтез поливинилового спирта осуществляется реакцией щелочного либо кислотного гидролиза или алкоголиза сложных поливиниловых эфиров. ПВС - твердый полимер белого цвета без вкуса и запаха, нетоксичен. ПВС может кристаллизоваться при термообработке в интервале 80-225 °С, достигая степени кристалличности (68 %). Макромолекулы поливинилового спирта обычно содержат 1,0-2,5 % звеньев, присоединенных по типу «голова к голове», и имеют атактическое строение. Молекулярная масса ПВС в зависимости от способа получения лежит в пределах 5000 - 1000000 а. е.

В отличие от большинства полимеров на основе виниловых мономеров, ПВС не может быть получен непосредственно из соответствующего винилового спирта (ВС). Основным сырьем для получения ПВС служит поливинилацетат (ПВА).

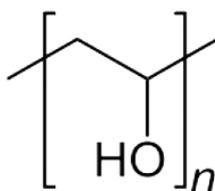


Рисунок 2.5. Химическая формула ПВС

Помимо трехмерной печати поливиниловый спирт широко применяется в различных отраслях промышленности, например в качестве:

- клея для бумаги и плит;
- загустителя и модификатора клеев на основе поливинилацетата;
- клея для текстильных материалов;
- покрытий;
- водорастворимых пленок;
- глазных капель и смазок жестких контактных линз;
- армирующих добавок в бетоны;
- сырья для поливинилнитрата;
- поверхностно-активных веществ (ПАВ);

- защитных перчаток;
- агента эмболизации в медицинских процедурах.

Поливиниловый спирт обладает уникальными свойствами и особой областью применения. Главной особенностью ПВС является его водорастворимость. 3D-принтеры, оснащенные двойными экструдерами, имеют возможность печати моделей с опорными структурами из ПВС (рис. 2.6). По завершении печати опоры могут быть растворены в воде, оставляя готовую модель, не требующую механической или химической обработки. Подобным образом поливиниловый спирт можно применять для создания водорастворимых мастер-моделей для литейных форм и самих литейных форм.

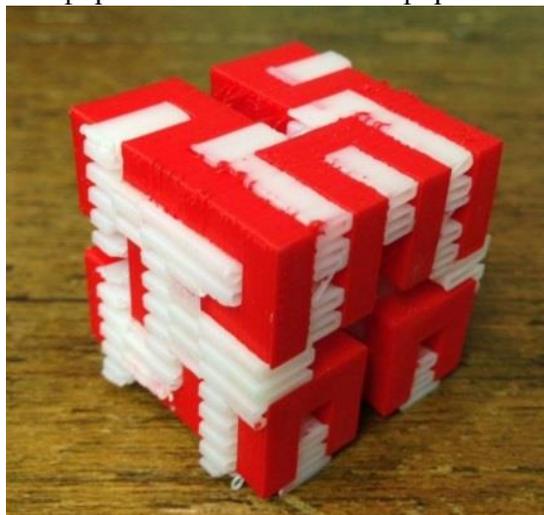


Рисунок 2.6. Модель, распечатанная из АБС-пластика (красный) и ПВС-пластика (белый). Опорные конструкции из ПВС подлежат удалению простым растворением в воде

Механические свойства ПВС достаточно интересны (табл. 2.3). При низкой влажности пластик обладает высокой прочностью на разрыв. При повышении влажности уменьшается прочность, но возрастает эластичность. Температура экструзии составляет 160-175 °С, что позволяет использовать ПВС в принтерах, предназначенных для печати АБС- и ПЛА-пластиками.

Таблица 2.3 Свойства поливинилового спирта

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а.е.	5000-200000
Степень кристалличности, %	30-70
Плотность, г/см ³	1,27-1,3
Температура плавления, °С	220-230
Температура стеклования, °С	85-90
Температура деструкции, °С	230
Теплостойкость по Мартенсу, °С	140
Теплостойкость по Вика, °С	160
Предел прочности при растяжении, МПа	60-120
Относительное удлинение при растяжении, %	10-30

Так как материал легко впитывает влагу, рекомендуется хранить ПВС-пластик в сухой упаковке и при необходимости просушивать перед использованием. Сушку можно проводить в гончарной печи или обыкновенной духовке. Как правило, просушка стандартных катушек занимает 6-8 часов при температуре 60-80 °С. Нагревание выше температуры 220 °С приведет к разложению пластика, что необходимо учитывать при печати.

Нейлоном (nylon) называют представителей семейства синтетических полиамидов, используемых преимущественно в производстве волокон. Под этим термином чаще всего понимаются поли-гекса-метилена-дипинамид (анид или нейлон-66), либо поли-ε-капроамид (капрон или нейлон-6). Химические формулы основных разновидностей нейлона показаны на рисунке. Две эти разновидности нейлона очень схожи. С точки зрения 3D-печати основным различием является температура плавления: нейлон-6 плавится при температуре 220 °С, а нейлон-66 при 265 °С (табл. 2.4). Наиболее популярным в трехмерной печати является нейлон-66. Этот полимер был разработан американской компанией DuPont в 1935 году.

Таблица 2.4 Свойства нейлонов

Свойства	ПА-66	ПА-6
Степень кристалличности, %	40-60	
Плотность, г/см ³	1,14-1,15	1,13-1,15
Модуль упругости, МПа	1700	1100
Ударная вязкость с надрезом, по Шарпи, кДж/м ²	12	20
Температура плавления, °С	260	222
Относительное удлинение при растяжении, %	16-60	
Водопоглощение, %	2,50	3,00
Плотность сухого материала, г/см ³	1,14	1,14

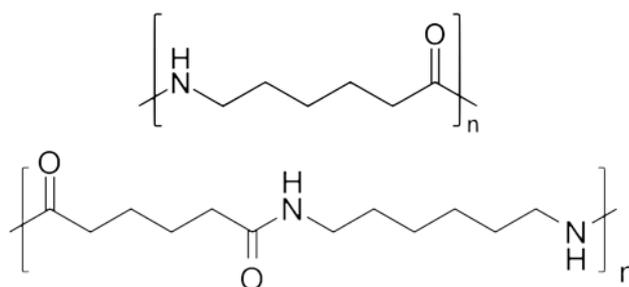


Рисунок 2.7. Химическая формула нейлона (капрон - сверху, анид – снизу)

В кристаллических участках макромолекулы нейлонов имеют конформацию плоского зигзага с образованием с соседними молекулами водородных связей между атомами кислорода карбонила и атомами водорода соседних амидных групп. Вследствие этого нейлоны обладают лучшими по сравнению с полиэфирами и полиолефинами, физико-механическими свойствами: более высокими степенью кристалличности (40-60 %) и температурами стеклования и плавления.

При повышении степени кристалличности нейлонов их прочностные характеристики улучшаются, такое повышение кристалличности происходит и при холодной вытяжке волокна на 400-600 %, происходящая при этом ориентация макромолекул в направлении вытяжки ведет к повышению кристалличности и упрочнению волокна в 4-6 раз.

В промышленности нейлон применяется для изготовления втулок, вкладышей, пленок и тонких покрытий. Нейлон, нанесенный на трущиеся поверхности в виде облицовки или тонкослойного покрытия на тонкие металлические втулки, вкладыши и корпуса подшипников, повышает их эксплуатационные качества. В подшипниковых узлах трения удельные давления, диапазон рабочих температур примерно такие же, как у баббита. Нейлон имеет низкий коэффициент трения и низкую температуру на трущихся поверхностях. Коэффициент трения у нейлона при работе по стали без смазки или при недостаточной смазке равен 0,17-0,20, с масляной смазкой - 0,014-0,020, с водой в качестве смазки - 0,02-0,05. Хорошие антифрикционные свойства позволяют применять нейлон в парах трения без смазки или при недостаточной смазке. Лучшим смазывающим материалом для композитов

на основе нейлона являются минеральные масла, эмульсии и вода. При температурах до 150°C на нейлон не влияют минеральные масла, консистентные смазки. Он не растворяется в большинстве органических растворителей, не поддается воздействию слабых растворов кислот, щелочей и соленой воды.

Нейлоны при нагревании на воздухе подвергаются термоокислительной деструкции, ведущей к снижению прочностных характеристик: при выдерживании на воздухе при температурах 100—120°C предел прочности на растяжение снижается в 5-10 раз. Деструкция ускоряется под воздействием ультрафиолетового излучения.

Нейлон привлекателен своей высокой износоустойчивостью и низким коэффициентом трения. Так, нейлон зачастую используется для покрытия трущихся деталей, что повышает их эксплуатационные качества и даже позволяет функционировать без смазки. Вслед за широким применением нейлона в промышленности материалом заинтересовались и в сфере аддитивного производства. Попытки печатать нейлоном предпринимались практически с первых дней появления технологии послойного наплавления.

Многие любители предпочитают использовать нейлоновые нити, доступные в широкой продаже, такие, как проволока для садовых триммеров. Диаметр таких нитей часто соответствует диаметру стандартных экструзионных расходных материалов, что делает их использование весьма заманчивым. В то же время подобные продукты, как правило, не являются чистым нейлоном. В случае с прутками для триммеров материал состоит из нейлона и стеклопластика (для оптимального сочетания гибкости и жесткости). Высокая прочность нейлона делает его незаменимым при изготовлении парашютных тканей, строп и лямок; во время Второй мировой войны большая часть нейлона использовалась именно для этих целей. Высокая прочность и хорошая гибкость дают возможность использовать нейлон в качестве швейных ниток, лент и канатов (Рисунок 2.8). Существует множество и других областей, где нейлон находит применение, однако в наибольшей степени превосходные свойства нейлона проявляются в трикотажных изделиях. Предполагается, что нейлон в возрастающих количествах будет использоваться также в ковровом производстве. У нейлоновых ковров продолжительный срок службы даже в тяжелых условиях эксплуатации, они меньше загрязняются и легко чистятся.



Рисунок 2.8. Нейлоновая лента

В последнее время предпринимаются попытки коммерческой разработки печатных материалов на основе нейлона специально для устройств печати эрозионного типа, в том числе Nylon-PA6 и Taulman 680. Указанные марки подлежат экструзии при температуре 230-260 °C.

Так как нейлон легко впитывает влагу, расходный материал следует хранить в вакуумной упаковке или контейнере с абсорбирующим агентом. Признаком чрезмерно влажного материала является пар, исходящий из сопла во время печати. Это неопасно,

однако может значительно ухудшить качество модели.

При печати нейлоном не рекомендуется использовать полиимидное покрытие рабочего стола, так как эти материалы легко сплавляются друг с другом. В этом случае в качестве покрытия рекомендуется применять липкую ленту с восковой пропиткой (masking tape). Использование подогреваемой платформы позволяет снизить возможность деформации модели аналогично печати АБС-пластиком. В связи с низким коэффициентом трения нейлона следует использовать экструдеры с шипованными протягивающими механизмами.

Слои нейлона, наносимые принтером, имеют отличную адгезию друг к другу, что минимизирует вероятность расслоения моделей.

Однако после застывания нейлон плохо поддается склеиванию, поэтому печать крупных моделей из составных частей затруднительна. Альтернативой склеиванию может являться сплавка. Так как при нагревании нейлона возможно выделение токсичных паров, рекомендуется печатать в хорошо вентилируемых помещениях или с использованием вытяжки.

Поликарбонаты (ПК, РС) - термопластичные полимеры, представляющие собой сложные полиэфиры угольной кислоты и различных двухатомных спиртов. Общая формула поликарбонатов имеет следующий вид: $(-O-R-O-CO-)_n$. Наибольшее промышленное значение имеют ароматические поликарбонаты, в первую очередь, поликарбонат на основе бисфенола А (Рисунок 2.9). Это объясняется широкой доступностью бисфенола А, который может быть синтезирован конденсацией фенола и ацетона.

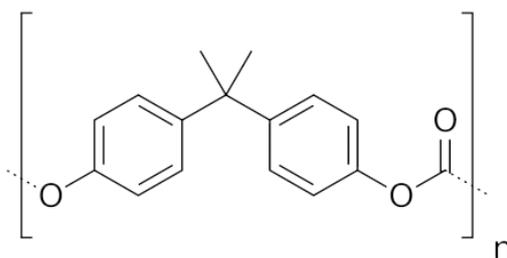


Рисунок 2.9. Химическая формула поликарбоната, полученного на основе бисфенола А

Поликарбонаты привлекательны за счет своей высокой прочности и ударной вязкости, а также устойчивости к высоким и низким температурам (табл. 2.5). Стоит отметить потенциальный риск для здоровья при печати: в качестве сырья зачастую используется токсичное и канцерогенное соединение бисфенол А. Остаточный бисфенол А может содержаться в готовых изделиях из поликарбоната и испаряться при нагревании. Поэтому печать моделей из поликарбоната, как и из нейлона, рекомендуется проводить в хорошо вентилируемых помещениях.

Таблица 2.5 Свойства поликарбоната на основе бисфенола А

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а.е.	20000-120000
Степень кристалличности, %	аморфный
Плотность, г/см ³	1,2
Температура размягчения, °С	220
Температура стеклования, °С	150
Температура деструкции, °С	310-320
Теплостойкость по Вика, °С	150-155
Предел прочности при растяжении, МПа	65-70
Предел прочности при изгибе, МПа	95

Благодаря сочетанию высоких механических и оптических качеств монолитный

пластик также применяется в качестве материала при изготовлении линз, компакт-дисков, фар, компьютерных корпусов, очков и светотехнических изделий. Наиболее популярный в России формат применения — листовой поликарбонат: ячеистый и монолитный. Листовой поликарбонат применяется в качестве светопрозрачного материала в строительстве.

Температура экструзии поликарбоната зависит от скорости печати. Высокие скорости при низких температурах могут стать причиной растрескивания изделий. Минимальной температурой при скорости печати 30 мм/с можно считать 265 °С. При печати рекомендуется использовать полиимидную пленку для лучшего схватывания с поверхностью рабочего стола. Высокая склонность поликарбоната к деформации требует использования подогреваемой платформы и, при возможности, закрытого корпуса с подогревом рабочей камеры.

Поликарбонат обладает высокой гигроскопичностью (легко поглощает влагу из атмосферы), поэтому необходимо хранить материал в сухих условиях во избежание образования пузырьков в наносимых слоях. В случае длительной печати во влажном климате может потребоваться хранение рабочей катушки во влагозащитном контейнере.

Полиэтилен (ПЭ, PE) - термопластичный полимер этилена, относящийся к классу полиолефинов (Рисунок 2.10). Полиэтилен - самый распространённый пластик в мире.

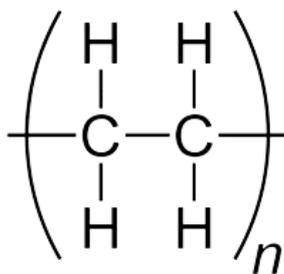


Рисунок 2.10. Химическая формула полиэтилена

В зависимости от способа получения различают полиэтилен высокого давления, или низкой плотности (ПЭВД, ПЭНП или LDPE - Low Density Polyethylene), и полиэтилен низкого давления, или высокой плотности (ПЭВП, ПЭНД или HDPE - High Density Polyethylene). Они отличаются друг от друга структурой макромолекул (наличием у полиэтилена высокого давления длинноцепочечных ответвлений), а следовательно, и свойствами (табл. 2.6).

Таблица 2.6 Свойства полиэтилена

Показатель	Значение	
	ПЭВД	ПЭНД
Молекулярная масса, а.е.	30000-40000	50000-5000000
Степень кристалличности, %	60	70-90
Плотность, г/см ³	0,913-0,930	0,910-0,970
Температура плавления, °С	105-120	125-140
Твердость по Бринеллю, МПа	15-25	50-70
Ударная вязкость с надрезом, кДж/м ²	-	2-45
Предел прочности при растяжении,	9-16	10-30
Относительное удлинение при растяжении, %	100-800	50-1200

Полиэтилен легко плавится (при 130-145 °С) и быстро застывает (при 100-120 °С), вследствие чего наносимые слои зачастую не успевают схватываться. Полиэтилен отличается высокой усадкой, что провоцирует закрутку первых слоев и деформацию моделей в целом при неравномерном застывании. Печать полиэтиленом требует

использования подогреваемой платформы и рабочей камеры с аккуратной регулировкой температурного режима для замедления остывания нанесенных слоев. Кроме того, потребуется проводить печать на высокой скорости.

Полиэтилен относительно мало представлен среди материалов для трехмерной печати. Причиной тому служат сложности при послойном изготовлении моделей.

Трудности в использовании с лихвой компенсируются дешевизной и общедоступностью этого материала. В последнее время были разработаны несколько устройств для переработки пластиковых отходов ПЭНД (бутылок, пищевой упаковки и пр.) в стандартные нити для печати на экструзионных принтерах. Примерами служат FilaBot и RecycleBot. За счет простоты конструкции устройства RecycleBot зачастую собираются силами энтузиастов. При плавлении полиэтилена происходит эмиссия паров вредных веществ, поэтому рекомендуется проводить печать в хорошо вентилируемых помещениях.

Полипропилен (ПП, PP) - термопластичный полимер пропилена (Рисунок 2.11).

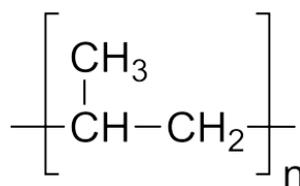


Рисунок 2.11. Химическая формула полипропилена

Полипропилен имеет низкую плотность, нетоксичен, обладает высокой химической стойкостью, устойчив к влаге и износу и достаточно дешев (табл. 2.7). Среди недостатков полипропилена следует отметить низкую морозостойкость (при отрицательных температурах материал становится хрупким) и уязвимость к прямому воздействию солнечного света.

Полипропилен широко применяется в производстве упаковочных материалов, посуды, шприцов, труб, нетканых материалов и электроизоляции.

Главной трудностью при печати полипропиленом является высокая усадка материала при охлаждении - до 2,4 %. Для сравнения: усадка АБС-пластика составляет 0,8 %. Несмотря на то, что полипропилен хорошо прилипает к холодным поверхностям, рекомендуется проводить печать на подогреваемой платформе для предотвращения деформации моделей. Минимальная рекомендуемая температура экструзии полипропилена составляет 220 °С.

Таблица 2.7 Свойства полипропилена

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а.е.	75000-Э00000
Степень кристалличности, %	до 75%
Плотность, г/см ³	0,90-0,91
Температура плавления, °С	160-180
Температура стеклования, °С	От -10 до -20
Морозостойкость, °С	От -5 до -25
Теплостойкость (по Вика), °С	95-110
Предел прочности при растяжении, МПа	Э0-Э5
Ударная вязкость с надрезом, кДж/м ²	5-12

Полипропиленовые нити для печати предлагаются на продажу компаниями Orbi-Tech, German RepRap, Qingdao TSD. Компания Stratasys разработала имитатор полипропилена, оптимизированный для 3D-печати, под названием Endur.

Поликапролактон (Polycaprolactone, PCL) - биоразлагаемый полиэфир, синтезируемый из ε-капролактона (Рисунок 2.12). Главной отличительной чертой

поликапролактона является чрезвычайно низкая температура плавления - 60 °С. Благодаря этому материал идеально подходит для моделирования и быстрого прототипирования. Управлением по контролю качества пищевых продуктов и лекарственных препаратов США поликапролактон разрешен для биомедицинского применения. Перспективным направлением применения материала является производство саморассасывающихся имплантов и хирургических нитей.

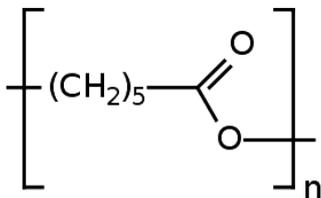


Рисунок 2.12. Химическая формула поликапролактона

Поликапролактон нетоксичен, что обуславливает его применение в медицинской отрасли, и биоразлагаем. При попадании в организм поликапролактон распадается, что делает печать этим материалом безопасной. Благодаря низкой температуре плавления отсутствует опасность ожогов при прикосновении к свежим моделям. Высокая пластичность материала делает возможным многократное использование. Плотность поликапролактона составляет 1,15 г/см³.

Легкоплавкость поликапролактона приводит к определенным трудностям при трехмерной печати, так как далеко не все 3D- принтеры можно настроить для работы при столь низких температурах. Нагревание поликапролактона до привычных экструзионных температур (около 200 °С) вызывает потерю механических свойств и может привести к поломке экструдера.

Поликапролактон малоприспособен для создания функциональных механических моделей ввиду вязкости (температура стеклования составляет 60 °С) и низкой теплостойкости. С другой стороны, этот материал прекрасно подходит для производства макетов и пищевой упаковки. Материал легко слипается с поверхностью даже холодного рабочего стола и легко поддается окраске.

Полифенилсульфон (PPSU) - высокопрочный термопластичный полимер (рис. 2.13), активно применяемый в авиационной промышленности. Материал имеет прекрасную химическую и тепловую устойчивость и практически не горит. Полифенилсульфон биологически инертен, что позволяет использовать этот материал для производства посуды и пищевых контейнеров. Диапазон эксплуатационных температур полифенилсульфона составляет от -50 до +180 °С. Материал устойчив к воздействию растворителей и горюче-смазочных материалов. Плотность полифенилсульфона составляет 1,29 г/см³, предел текучести 76 МПа.

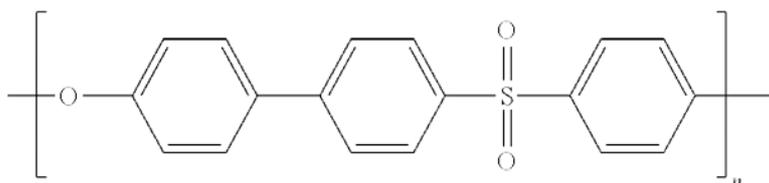


Рисунок 2.13. Химическая формула полифенилсульфона

При всех своих достоинствах полифенилсульфон редко используется в 3D-печати ввиду высокой температуры плавления, достигающей 370 °С. Такие температуры экструзии не под силу большинству настольных принтеров, хотя теоретически печать возможна при использовании керамических сопел. В настоящее время единственным активным пользователем материала является компания Stratasys, предлагающая промышленные

установки Fortus.

Полиметилметакрилат (ПММА, РММА) - синтетический виниловый полимер метилметакрилата (Рисунок 2.14), термопластичный прозрачный пластик, широко известный как оргстекло.

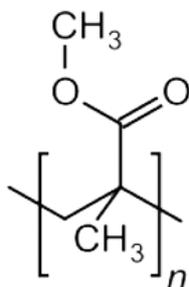


Рисунок 2.14. Химическая формула полиметилметакрилата

Полиметилметакрилат прочен, влагоустойчив, безопасен для окружающей среды, легко поддается склеиванию, достаточно пластичен и устойчив к воздействию прямого солнечного света. Технические характеристики ПММА представлены в табл. 2.8.

Таблица 2.8 Характеристики полиметилметакрилата

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а.е.	400000-500000
Степень кристалличности, %	аморфный
Плотность, г/см ³	1,2
Температура плавления, °С	160-180
Температура размягчения, °С	95-105
Относительное удлинение при растяжении, %	4-5
Предел прочности при растяжении, МПа	70
Ударная вязкость, кДж/м ²	18-20
Модуль упругости при растяжении, МПа	3000-3500

Полиметилметакрилат плохо подходит для экструзивной 3D-печати в силу ряда причин. ПММА плохо хранится в виде катушек с нитью, так как постоянное механическое напряжение приводит к постепенному разрушению материала. Чтобы избежать образования в печатном изделии пузырьков, разрешение печати должно быть очень высоким. Такое разрешение практически недоступно для домашних принтеров. Быстрое застывание полиметилметакрилата требует жесткого климатического контроля рабочей камеры и высокой скорости печати. Показатели скорости печати принтеров экструзионного типа обратно пропорциональны разрешению, что усугубляет проблему. Тем не менее, попытки печати полиметилметакрилатом предпринимаются регулярно. Некоторые из них дают положительные результаты. Однако при создании достаточно прочных моделей избежать образования пузырьков и достигнуть привычной прозрачности материала пока не удастся.

На данный момент наилучшие результаты с полиметилметакрилатом показывает другая технология печати - многоструйное моделирование (MJM) от компании 3D-Systems. В данном случае используется фотополимерный вариант акрила. Значительных успехов достигла и компания Stratasys, использующая собственный фотополимерный имитатор акрила VeroClear на принтерах марки Objet Eden. Остается надеяться, что высокий спрос на акрил приведет к появлению композитных материалов на основе полиметилметакрилата, предназначенных специально для печати методом послойного наплавления.

Полиэтилентерефталат (ПЭТФ, PET или PETP) - продукт поликонденсации этиленгликоля с терефталевой кислотой или её диметиловым эфиром (Рисунок 2.15). Это твёрдое бесцветное прозрачное вещество в аморфном состоянии и белое непрозрачное в

кристаллическом состоянии. Материал используется для производства пластиковых бутылок и другой пищевой и медицинской тары.

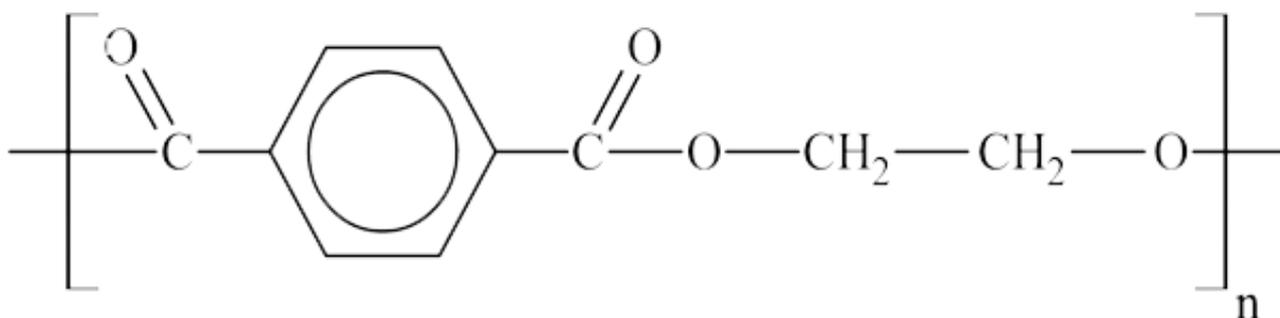


Рисунок 2.15. Химическая формула ПЭТФ

Полиэтилентерефталат имеет высокую химическую устойчивость к кислотам, щелочам и органическим растворителям. Полиэтилентерефталат (табл. 2.9) обладает высокой износостойкостью и стойкостью к широкому диапазону температур (от -40 °С до +75 °С). Кроме того, ПЭТФ легко поддается механической обработке.

Таблица 2.9 Свойства полиэтилентерефталата

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а.е.	20000-50000
Степень кристалличности, %	2,5-65
Плотность, г/см ³	1,4
Температура размягчения, °С	240
Температура плавления, °С	260
Температура разложения, °С	Э40
Температура стеклования, °С	70
Морозостойкость, °С	-60
Предел прочности при растяжении, МПа	170
Ударная вязкость, кДж/м ²	9
Модуль упругости при растяжении, МПа	3500

Печать с использованием ПЭТФ несколько проблематична ввиду сравнительно высокой температуры плавления, достигающей 260 °С, и значительной усадки при остывании, составляющей до 2 %. Использование ПЭТФ в качестве расходного материала требует примерно тех же условий, что и печать АБС-пластиком. Для достижения прозрачности моделей необходимо быстрое охлаждение при прохождении порога стеклования, составляющего 70-80 °С.

Материал стал предметом внимания умельцев, применяющих использованную тару в качестве сырья для бытового производства расходных материалов для 3D-печати. Для изготовления нитей используются такие перерабатывающие устройства, как FilaBot или RecycleBot.

Полистирол (Expandable PolyStyrene, **EPS**) - термопластичный полимер (Рисунок 2.16), продукт полимеризации стирола (винилбензола). Полистирол обладает линейной структурой. Материал широко используется в промышленности для производства различных бытовых изделий, строительных материалов, одноразовой посуды, игрушек, медицинских инструментов и пр.

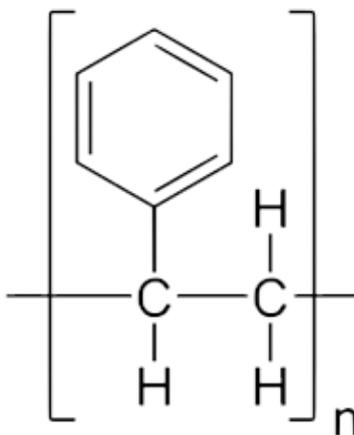


Рисунок 2.16. Химическая формула полистирола

При трехмерной печати полистирол демонстрирует физические свойства (табл. 2.10), схожие с АБС-пластиком, что делает этот материал все более популярным среди потребителей.

Таблица 2.10 Свойства полистирола

Показатель	Значение
Молекулярная масса, а.е.	60000-26000
Степень кристалличности, %	Аморфный
Плотность, г/см ³	1,069-1,125
Теплостойкость по Мартенсу, °С	93
Температура плавления, °С	240
Температура разложения, °С	290
Температура стеклования, °С	93
Твердость по Бринеллю, МПа	140-200
Предел прочности при растяжении, МПа	40-50
Ударная вязкость с надрезом, по Шарпи, кДж/м ²	1,5 2,0
Модуль упругости при изгибе, ГПа	3,2

Наиболее привлекательной особенностью полистирола являются его специфические химические свойства: полистирол легко поддается растворению в органическом растворителе лимонене. Так как АБС-пластик в лимонене не растворяется, поэтому возможно использование полистирола в качестве материала для построения растворимых поддерживающих структур, что исключительно полезно при построении сложных, переплетенных моделей с внутренними опорами. В сравнении с водорастворимым поливиниловым спиртом полистирол выгодно отличается относительно низкой стоимостью и устойчивостью к влажному климату, затрудняющему работу с ПВС.

Стоит иметь в виду, что некоторые производители филаментов из АБС-пластика используют в своей продукции несколько более дешевый полистирол. Соответственно модели из таких материалов могут раствориться в лимонене вместе с опорными структурами.

При нагревании полистирола до температуры экструзии возможно выделение токсичных испарений, поэтому рекомендуется осуществлять печать в хорошо проветриваемых помещениях.

Древесно-полимерные композиционные материалы (ДПК). Недавняя разработка компании LAYWOO-D3 (Рисунок 2.17) предназначена для печати моделей, напоминающих

деревянные изделия. Материал на 40 % состоит из натуральных древесных опилок микроскопического размера и на 60 % из связующего полимера (полимерной матрицы). В качестве полимерных матриц для LAYWOO-D3 весьма прост в обращении, будучи практически неподверженным деформациям и не требуя использования подогреваемой платформы. Согласно производителям, материал нетоксичен и полностью безопасен.



Рисунок 2.17. Филамент LAYWOO-D3

Уникальные свойства материала позволяют добиваться различных визуальных результатов при печати с разными температурами сопла. Диапазон рабочих температур составляет 180 °С - 250 °С. По мере увеличения температуры экструзии оттенок материала становится более темным, позволяя имитировать разные сорта древесины или годовые кольца.

Готовые модели (Рисунок 2.18) прекрасно поддаются механической обработке - шлифовке, сверлению и пр. Кроме того, изделия легко окрашиваются, а неокрашенные модели даже имеют характерный древесный запах.



Рисунок 2.18. Модели, полученные из филамента ДПК

В настоящее время ведутся разработка и тестирование альтернативных материалов, таких, как BambooFill (Рисунок 2.19), от голландской компании ColorFabb. В состав композита входит примерно 80 мас. % полилактида и 20 мас. % вторичного бамбукового волокна.



Рис. 2.19. Модели, полученные из филамента *BambooFill*

К сожалению, стоимость древесно-полимерных композитов значительно превышает цену на такие популярные печатные материалы, как полилактид и АБС-пластик. По мере роста популярности древесно-полимерных композиционных материалов в трехмерной печати ожидается снижение их стоимости.

Композиты, имитирующие минералы. Представленный недавно изобретателем Каем Парти композитный материал, представляет собой сочетание полимерной матрицы и минерального наполнителя. Различные комбинации компонентов материалы позволяют производить объекты с различной текстурой поверхности. При низких температурах экструзии порядка 165 °С-190 °С готовые изделия имеют гладкую поверхность. Повышение температуры печати делает материал более шершавым. При температуре экструзии свыше 210 °С материал обретает высокую степень сходства с натуральным песчаником.

Материал легок в работе, не требует подогрева рабочей платформы, не демонстрирует существенных деформаций при усадке и не выделяет токсичных испарений при нагревании. Единственным недостатком материала можно считать его довольно высокую стоимость, что обусловлено малыми масштабами производства.

Композиты, имитирующие металлы. Металлы привлекают сторонников аддитивного производства с самого начала появления технологий 3D-печати. К сожалению, печать чистыми металлами и сплавами вызывает массу трудностей, непреодолимых для большинства методов 3D-печати. Полностью функциональные металлические изделия можно произвести только с помощью таких технологий, как селективное лазерное спекание, прямое лазерное спекание металлов или электронно-лучевая плавка, требующих использования промышленных установок, чья стоимость исчисляется сотнями тысяч долларов. В то же время имитаторы металлов успешно используются в струйной 3D-печати, где формирование изделий происходит из металлических порошков, частицы которых скрепляются наносимым связующим материалом. В экструзионной печати металлические имитаторы лишь появляются на свет.

Интересным примером служит филамент *BronzeFill* (Рисунок 2.20) - фактически, прозрачный полилактид с наполнителем из микрочастиц бронзы. Материал, в настоящее время проходящий бета-тестирование, должен доказать пригодность для использования в любых принтерах, предназначенных для работы с полилактидом.



Рисунок 2.20. Модели, полученные из филамента BronzeFill

Готовые изделия легко поддаются полировке, достигая высокого внешнего сходства с цельнометаллическими изделиями. В то же время стоит учитывать, что связующим элементом материала является термопластичный полимер, с соответствующими механическими и температурными ограничениями.

2.3.Стереолитография (SLA)

Стереолитография (SLA) - технология аддитивного производства изделий из жидких фотополимерных смол. Термин «стереолитография» был придуман в 1986 году Чарльзом В. Халлом, запатентовавшим метод и аппарат для производства твердых физических объектов за счет последовательного наложения фотополимерного материала. Патент Халла описывал применение ультрафиолетового лазера, проецируемого на поверхность емкости, заполненной жидким фотополимером. Облучение лазером ведет к затвердеванию материала в точках соприкосновения с лучом, что позволяет вычерчивать контуры заданной модели слой за слоем (Рисунок 2.21).

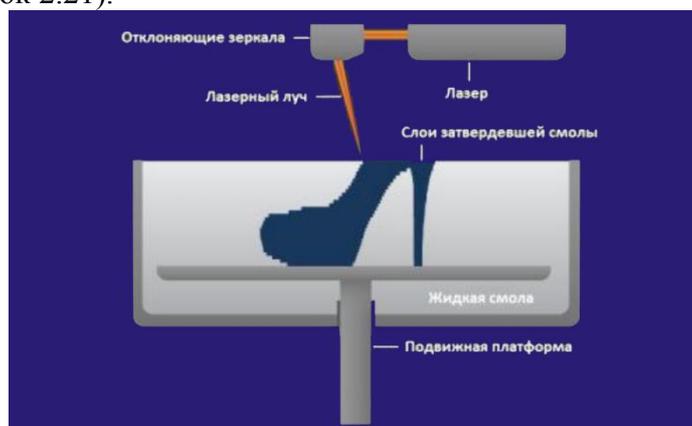


Рисунок 2.21. Схема работы принтера по методу стереолитографии

В 1986 году Халл основал собственную компанию, 3D-Systems, для коммерческого продвижения новой технологии. На сегодняшний день 3D Systems является одним из мировых лидеров среди компаний-разработчиков и поставщиков технологий аддитивного производства, а технология стереолитографии является первой запатентованной и получившей коммерческое распространение технологией трехмерной печати.

Метод основан на эффекте фотополимеризации (Рисунок 2.22) различных мономеров и олигомеров под действием излучения. Выделяют два основных вида фотополимеризации: радикальную и ионную.

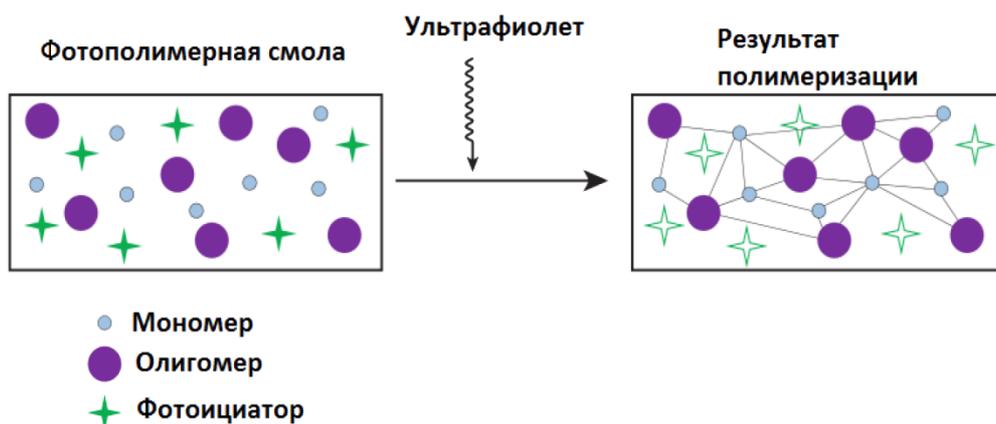


Рисунок 2.22. Схема процесса фотополимеризации

Радикальная полимеризация - это процесс образования полимера, когда стадии инициирования и роста цепи протекают с участием радикалов. Поскольку одним из основных способов получения свободных радикалов является фотоиницированная диссоциация, то соответственно фотоиницированная полимеризация мономеров и олигомеров, или просто фотополимеризация, является одной из основных разновидностей радикальной полимеризации как в производственных технологиях, так и при проведении научных экспериментов.

Кинетическая схема процесса фотоиницированной радикальной полимеризации выглядит следующим образом. Сначала происходит процесс поглощения света молекулой фотоинициатора. Поглотившая свет молекула переходит в возбужденное состояние и далее идет процесс разрыва химической связи. Разрушается, как правило, самая слабая (либо одна из самых слабых) связь в молекуле. Соединения, используемые как фотоинициаторы, диссоциируют на два радикала или за счет внутримолекулярной перегруппировки образуется бирадикал-молекула, имеющая в разных частях две свободных валентности. В ряде случаев вместо фотоинициатора используются специальные добавки, фотосенсибилизаторы, которые поглощают свет в данной области спектра. Возбужденный сенсибилизатор либо передает поглощенную энергию инициатору, либо взаимодействует с ним, образуя пару свободных радикалов.

В зависимости от типа иона выделяют анионную и катионную полимеризации. *Катионная полимеризация* является разновидностью ионной полимеризации, которая подразумевает, что цепная реакция инициируется взаимодействием иона с реакционноспособной группой в мономере или олигомере.

Более исследованными и более широко используемыми фотоинициаторами являются именно катионные инициаторы. Так как при фотодиссоциации известных ионных инициаторов образуется активный катион и малоактивный анион, то под ионной фотополимеризацией подразумевают как правило катионную фотоиницированную полимеризацию. Наиболее широкое применение в 3D-печати находит также именно катионная фотополимеризация. По катионному механизму могут полимеризоваться виниловые и диеновые мономеры и олигомеры, акрилаты и их производные, соединения с гетероциклами. Полимеризация последних протекает с раскрытием цикла в процессе получения полимера.

Кинетическая схема процесса *ионной полимеризации* выглядит следующим образом. Первая стадия взаимодействие фотоинициатора с УФ излучением. На этой стадии фотоинициатор I под действием поглощенного кванта света образует ионную пару K^+ и A^- . Эта ионная пара может остаться в виде соединения с ионной связью либо протиссоциировать на катион и анион. Обычно один из ионов превосходит другой по реакционной способности и даже, несмотря на потенциальную возможность присутствующего мономера

или олигомера, поли меризоваться как по анионному, так и по катионному механизмам, только один ион из пары инициирует цепной процесс. Образовавшийся катион взаимодействует со следующей молекулой мономера или олигомера.

Обрыв цепи рекомбинацией полимерного катиона с анионом происходит очень редко. Как правило, обрыв цепи происходит либо передачей цепи на мономер с отщеплением атома водорода и образованием малоактивного катиона, либо цепная реакция прекращается тогда, когда полимерная молекула теряет подвижность и катион оказывается пространственно изолированным в окружающей полимерной матрице. Для соединений, имеющих в своей структуре гетероциклы, уравнение реакции инициирования цепи и раскрытия цикла выглядит следующим образом: образовавшийся катион взаимодействует с другой молекулой мономера, что также приводит к раскрытию цикла.

Построение модели методом стереолитографии проводится слой за слоем. Каждый слой вычерчивается лазером согласно данным, заложенным в трехмерной цифровой модели. Облучение лазером приводит к полимеризации (т.е. отверждению) материала в точках соприкосновения с лучом. Для наглядности этот процесс можно сравнить с отверждением эпоксидной смолы (олигомера) под действием отвердителя (реагента). В обычном состоянии она жидкая, но, вступая в реакцию, ее молекулы соединяются и застывают, превращаясь в твердый полимер.

По завершении построения контура рабочая платформа погружается в бак с жидкой смолой на дистанцию, равную толщине одного слоя, как правило, от 0,05 мм до 0,15 мм. После выравнивания поверхности жидкого материала начинается процесс построения следующего слоя. Цикл повторяется до построения полной модели. После завершения постройки изделия промываются для удаления остаточного материала и при необходимости подвергаются обработке в ультрафиолетовой печи до полного затвердевания фотополимера.

Стереолитография требует использования поддерживающих структур для построения навесных элементов модели, аналогично технологии моделирования методом послойного наплавления (FDM). Опоры предусматриваются в файле, содержащем цифровую модель, и выполняются из того же фотополимерного материала. По сути, опоры являются временными элементами конструкции, удаляемыми вручную после завершения процесса изготовления.

Главным преимуществом стереолитографии можно считать высокую точность печати. Существующая технология позволяет наносить слои толщиной 15 микрон, что в несколько раз меньше толщины человеческого волоса. Точность изготовления достаточно высока для применения в производстве прототипов стоматологических протезов и ювелирных изделий.

Скорость печати относительно высока, если учитывать высокое разрешение подобных устройств: время построения одной модели может составлять лишь нескольких часов, но в итоге зависит от размера модели и количества лазерных головок, используемых устройством одновременно. Относительно небольшие настольные устройства могут иметь область построения от 50 до 150 мм в одном измерении. В то же время существуют промышленные установки, способные печатать крупногабаритные модели, где изделия измеряются уже в метрах. Готовые изделия могут обладать различными механическими свойствами в зависимости от заложенных характеристик фотополимера: существуют имитаторы твердых термопластичных полимеров, резины и других материалов.

В качестве расходных материалов в стереолитографии используются композиционные материалы на основе полифункциональных акриловых и метакриловых смол, а также неорганических наполнителей, обеспечивающих снижение величины усадки. В стереолитографии достаточно популярны и смеси эпоксидных смол с катионными фотоинициаторами.

Стоит отметить, что фотополимерные смолы могут иметь самые разные физические характеристики: некоторые виды могут напоминать АБС-пластик, а некоторые иметь эластичность на уровне резины. Доступны различные цвета и смолы с различной прозрачностью в полимеризованном состоянии. Разные смолы имеют разные показатели

токсичности. Некоторые смолы могут быть совместимы с различными принтерами, а некоторые «заточены» под конкретные системы. Все эти факторы определяют выбор печатного оборудования.

Хранение фотополимерных смол требует особого внимания. Дело в том, что длина волны излучения, которым может быть осуществлена засветка, варьируется от материала к материалу и не всегда указывается производителями. При обращении с фотополимерными смолами необходимо принимать основные меры предосторожности, использовать защитные очки и перчатки. Хотя сами смолы могут быть нетоксичны, зачастую требуется промывка готовых моделей растворителями, которые представляют опасность здоровью.

Стереолитография позволяет создавать детали высокой сложности, но зачастую имеет высокую стоимость за счет относительно высокой цены расходных материалов. Один литр фотополимерной смолы может стоить от 80 до 120 долларов, в то время как стоимость устройств может варьироваться от 10000 до 500 000 долларов. Высокая популярность технологии способствует разработке более доступных моделей, таких, как FORM 1 от компании Forml ABC или Pegasus Touch от компании FSL3D с заявленной стоимостью в 2400 и 3500 долларов соответственно.

В 2011 году в Венском Технологическом Университете был представлен компактный и относительно недорогой 3D-принтер, работающий по технологии стереолитографии. Масса представленного принтера составила 1,5 кг, а стоимость примерно 1200 евро.

Одно из преимуществ 3D-печати методом стереолитографии – скорость. Объекты возводятся в течение дня, хотя отдельные модели с особо сложной геометрией могут выращиваться до нескольких дней. Большинство аппаратов для стереолитографии работают с объектами, не превышающими 50x50x60 см, однако существуют исключения.

2.4. Технология многоструйного моделирования (MJM)

Технология многоструйного моделирования (MJM) – фирменный метод аддитивного производства, запатентованный компанией 3D Systems. Технология используется в линейке профессиональных принтеров ProJet [1].

Технология многоструйного моделирования сочетает черты таких методов 3D-печати, как струйная трехмерная печать (3DP), моделирование методом послойного наплавления (FDM/FFF) и стереолитография (SLA). Построение слоев проводится с помощью специальной печатной головки, оснащенной массивом сопел. Количество сопел в существующих моделях принтеров варьируется от 96 до 448.

Печать проводится термопластичными полимерами, восками и фотополимерными смолами. В первых двух случаях материалы затвердевают за счет постепенного охлаждения. В случае печати фотополимерами каждый нанесенный слой обрабатывается ультрафиолетовым излучателем для полимеризации (затвердевания).

Многоструйное моделирование позволяет создавать опоры нависающих элементов моделей из относительно легкоплавкого воска. В случае использования вспомогательных восковых структур по окончании печати готовая модель помещается в печь (встроенную или отдельную) и нагревается до температуры примерно 60 °C для выплавки воска.

Технология позволяет добиваться исключительно высоких показателей точности, сравнимых с лазерной стереолитографией (SLA) – минимальная толщина наносимого слоя может составлять 16 микрон, а разрешение печати в горизонтальной плоскости достигает 750x750x1600 DPI. Ранние модели MJM-принтеров использовали обычные термопластичные полимеры. Развитие и совершенствование фотополимерных материалов привели к постепенной замене термопластичных полимеров фотополимерными смолами и восками.

Принтеры ProJet используют ассортимент материалов марки VisiJet, включающий в себя воски и фотополимерные смолы с различными механическими свойствами. Так, VisiJet DentCast используется в качестве отливочного воска в стоматологии, VisiJet X служит в

качестве альтернативы популярному АБС-пластику, VisiJet Crystal применяется для создания высокоточных литейных мастер-моделей и т.д.

Технология MJM используется в различных отраслях, требующих создания высокоточных прототипов и готовых изделий (Рисунок 2.23). Среди областей применения можно назвать стоматологию, ювелирное дело, промышленный и архитектурный дизайн, разработку электронных компонентов и пр.



Рисунок 2.23. Изделия, полученные с помощью технологии многоструйного моделирования

2.5. Цифровая светодиодная проекция (DLP)

Цифровая светодиодная проекция (DLP) - метод аддитивного производства, родственник стереолитографической 3D-печати [1].

Метод использует цифровые светодиодные проекторы (DLP), позволяя снижать себестоимость устройств. В отличие от лазерных установок, сканирующих поверхность материала одним или несколькими лазерными головками, DLP-принтеры проецируют изображение целого слоя до затвердевания полимерной смолы, после чего наносится новый слой материала и проецируется изображение нового слоя цифровой модели.

О преимуществах того или иного метода сложно судить. Метод цифровой светодиодной печати появился не так давно, но уже демонстрирует прекрасные результаты, сопоставимые по точности и производительности с оригинальной технологией лазерной стереолитографии, запатентованной Чарльзом Халлом в 1986 году и давшей первый существенный толчок развитию трёхмерной печати. Основным преимуществом DLP перед стереолитографией может стать более низкая стоимость используемых проекторов по сравнению с лазерными излучателями.

С момента своего появления DLP-принтеры составляют прямую конкуренцию устройствам, работающим по технологии стереолитографии. DLP-принтеры применяются в стоматологии, ювелирной промышленности, свободном дизайне и в производстве сувениров.

Как и стандартные стереолитографические устройства, DLP-принтеры имеют высокие показатели точности печати - минимальная толщина слоя может достигать 15 микрон с использованием существующих установок. Минимальная толщина слоя, наносимого более доступными экструзионными принтерами, как правило, составляет не менее 50 микрон. С другой стороны, разрешение обратно пропорционально скорости нанесения слоев материала. Таким образом, технология позволяет достигать более высоких показателей точности ценой снижения скорости печати. Расходные материалы, а именно фотополимерные смолы, имеют высокий диапазон механических характеристик: возможны имитаторы в диапазоне от твердых пластиков до резины. Как правило, печать осуществляется материалом одного

цвета, но ограничений палитры не существует.

Основным недостатком метода DLP, как и стереолитографии, является относительно высокая стоимость расходных материалов - порядка \$ 80-160 за один литр жидкого полимера. Для сравнения: килограмм пластиковой нити для печати методом послойного наплавления можно приобрести за \$35. В итоге, пользователь должен найти правильный баланс между качеством и себестоимостью печати.

К достоинствам DLP-принтеров можно отнести высокие точность и скорость печати. Технология цифрового проецирования в целом очень эффективна, о чем говорит ее применение во многих сферах. Всегда важно обращать внимание на перспективность, а 3D-печать еще не раскрыла всех своих возможностей. Еще одним плюсом устройств для печати методом цифровой светодиодной проекции является их более низкая стоимость по сравнению с другими трехмерными принтерами.

К недостаткам можно отнести недостаточную безопасность используемых материалов. Существуют достаточно токсичные полимерные смолы. А еще они достаточно дороги. Но результаты вполне окупают эти недостатки.

2.6. Масочная стереолитография (SGC)

Масочная стереолитография (SGC) - метод аддитивного производства, во многом схожий с технологией печати методом цифровой светодиодной проекции (DLP) [1]. Технология была разработана и внедрена на рынок израильской компанией Cubital Ltd в 1986 году. Компания Cubital закончила свое существование, но интеллектуальные права были сохранены компанией Objet Geometries Ltd, а в 2012 году перешли к корпорации Stratasys в результате слияния двух компаний. В связи с этим вариант технологии SGC, используемый на принтерах конкурирующей компании 3D-Systems, известен под названием Film Transfer Imaging (FTI).

Технология основана на нанесении тонких слоев фотополимерной смолы с последующим облучением материала ультрафиолетовым светом. Облучение происходит по физическому фотошаблону, или «маске» соответствующего контура. Облучение приводит к полимеризации (затвердеванию) материала, после чего лишний материал удаляется из рабочей зоны, а полости заполняются легкоплавким воском. При необходимости проводится механическая обработка поверхности, после чего производственный цикл повторяется. По завершении построения модели воск выплавляется, оставляя готовую модель, не требующую дополнительного облучения в ультрафиолетовой печи для полной полимеризации.

В качестве расходных материалов используются фотополимерные смолы. Подбор подходящего материала может потребовать определенного внимания ввиду технологических особенностей производства - при необходимости механической обработки полимер должен обладать соответствующими характеристиками. Как правило, используются фотополимеры, напоминающие по прочности и вязкости АБС- пластик.

Основным преимуществом SGC является отсутствие необходимости в построении поддерживающих структур, как в случае с такими стереолитографическими методами, как SLA или DLP. В дополнение к высокому разрешению по горизонтали механическая обработка каждого наносимого слоя позволяет добиваться высокой точности по оси Z. Наконец, технология отличается достаточно высокой производительностью за счет одновременного облучения целых слоев.

Среди недостатков следует отметить относительно высокую шумность и большое количество отходов, повышающее себестоимость печати. Сами же установки довольно дороги ввиду сложности конструкции.

В последнее время метод SGC почти не используется, а его вариация FTI стала практически неотличима от цифровой светодиодной печати (DLP) ввиду внедрения цифровых проекторов.

2.7. Ламинирование (LOM)

Изготовление объектов методом ламинирования (LOM) - технология быстрого прототипирования, разработанная компанией Helisys Inc (Рисунок 2.24) [1]. Метод подразумевает последовательное склеивание листового материала (бумаги, пластика, металлической фольги) с формированием контура каждого слоя с помощью лазерной резки. Объекты, производимые этим методом, обычно подлежат дополнительной механической обработке после печати. Толщина наносимого слоя напрямую зависит от толщины используемого листового материала.

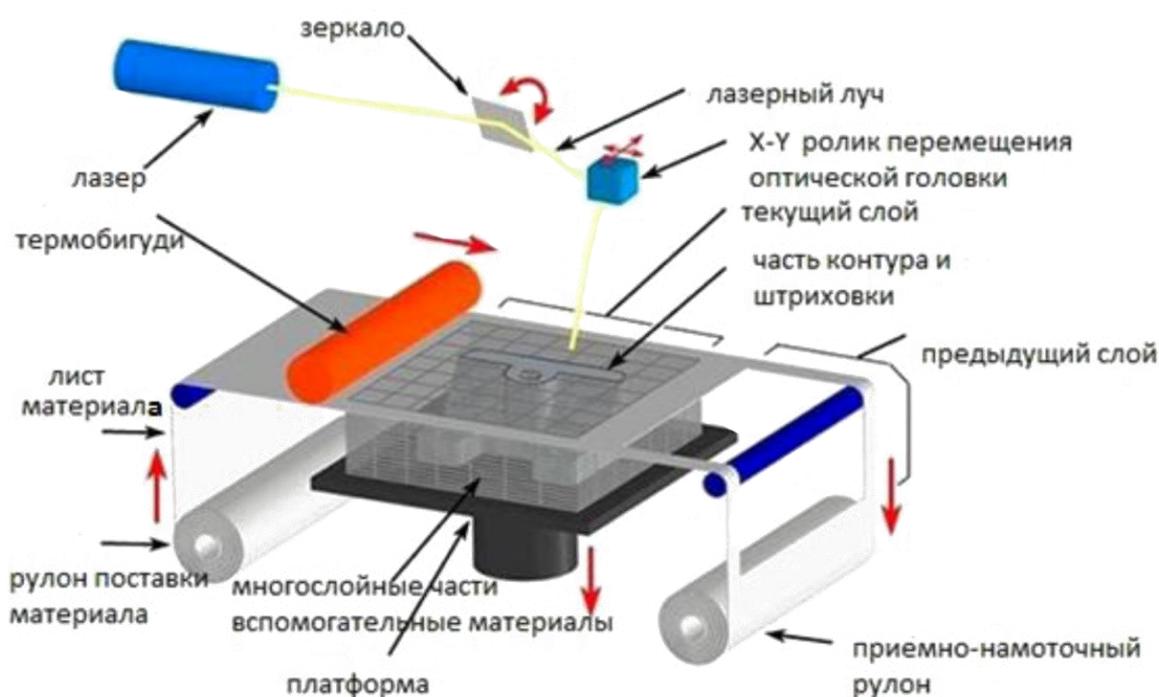


Рисунок 2.24. Схема процесса ламинирования

Процесс печати протекает следующим образом: Лист материала с клейким покрытием наносится на рабочую платформу (или нижние слои модели) с помощью разогретого ролика. Контур слоя вычерчивается с помощью лазера. Лишний материал режется лазером на мелкие секции для упрощения процедуры удаления. Платформа с готовым слоем передвигается вниз. В рабочую камеру подается новый лист материала. Платформа поднимается вверх до контакта с новым материалом. Цикл повторяется до завершения постройки модели, после чего лишний материал удаляется, и проводится завершающая механическая обработка изделия (сверление, шлифовка и пр.)

После того как печать завершена, объект снимается с платформы и лишняя часть материала удаляется. Изделия, для печати которых использовалась бумага, после завершения процесса по структуре напоминают дерево и могут быть соответствующим образом (с помощью инструментов для столярных работ) обработаны. Зачастую их покрывают лаком для защиты от влаги.

Компания Mcor Technologies использует вариант технологии, получивший название «выборочное ламинирование», или **SDL**. Этот метод предусматривает нанесения клея только в местах, входящих в состав расчетной модели, что облегчает процесс удаления лишнего материала. В отличие от стандартной технологии на основе лазерной резки, выборочное ламинирование использует механическую резку с помощью лезвия из карбида вольфрама. Это позволяет несколько снизить стоимость устройств.

Домашние 3D-принтеры, работающие по технологии ламинирования, - большая редкость. Существует принтер SD300 от компании Cubic Technologies, который можно

использовать в домашних условиях, но его стоимость составляет около 15 тысяч долларов.

В качестве расходных материалов в трехмерной печати методом ламинирования применяются различные типы бумаги, картона, пластика, текстильных материалов и фольги. Обязательным условием качественной печати является учет адгезионных свойств используемых расходных материалов.

По точности изготовления ламинирование уступает аналогам, однако имеет и некоторые достоинства. Например, материалы, используемые для печати в процессе ламинирования, являются достаточно недорогими, прочными, доступными, а их свойства хорошо изучены.

С другой стороны, этот метод не подходит для создания объектов со сложной структурой, а также не позволяет создавать изделия, полые внутри. Из-за не слишком высокой точности его нельзя использовать для создания функциональных прототипов. Подходящие для печати с использованием ламинирования объекты - это, в первую очередь, масштабные модели и прототипы для оценки формы и внешнего вида изделия. Также с его помощью можно изготавливать образцы для использования в промышленности (отливке металла и т.д.).

Особенностью метода является низкая себестоимость благодаря общедоступности расходных материалов. Бумажные модели приближаются по физическим характеристикам к древесине, что позволяет проводить соответствующую механическую обработку. Разрешение печати несколько уступает таким высокоточным методам, как стереолитография (SLA) или выборочное лазерное спекание (SLS). Технология ламинирования допускает производство достаточно крупногабаритных моделей.

2.8. Ламинирование методом селективного осаждения (SDL)

Ламинирование методом селективного осаждения (SDL) или 3D-печать на бумаге было изобретено докторами Конором и Финтаной Маккормак в 2003 году [1].

Технологию ламинирования методом селективного осаждения не стоит путать с более старой технологией изготовления объектов с использованием ламинирования (LOM).

В технологии LOM использовали лазер, ламинированную бумагу и клей так, что все склеивалось между собой, в том числе и поддерживающие структуры вокруг 3D-модели. Извлечение модели могло стать настоящим испытанием, зачастую приводящим к поломке изделия.

Компания Mcoг Technologies использует вариант технологии, получивший название «**выборочное ламинирование**», или **SDL**. Этот метод предусматривает нанесения клея только в местах, входящих в состав расчетной модели, что облегчает процесс удаления лишнего материала. В отличие от стандартной технологии на основе лазерной резки, выборочное ламинирование использует механическую резку с помощью лезвия из карбида вольфрама. Это позволяет несколько снизить стоимость устройств.

В технологии компании Mcoг используются лезвия для резки, а принтер склеивает только те части модели, которые склеить необходимо (Рисунок 2.25). Первый лист вручную прикрепляется к сборочной пластине. Расположить первый лист правильно не самое важное, так как первые несколько страниц соединяются вместе в качестве базового слоя, перед тем как начинается процесс нарезки.

После того как показатели измерения глубины лезвия и клеящего слоя выверены, двери принтера закрываются - аппарат готов к импорту данных от программы-слайсера. Вначале слой клея наносится на верхнюю часть листа, помещенного на сборочную пластину. Клей наносится выборочно; именно поэтому метод печати получил название "селективный". Иными словами, клеящий материал более высокой плотности будет нанесен на те области, которые впоследствии станут частью модели, а клеящее средство меньшей плотности будет нанесено на те части, которые будут служить ее поддержкой.

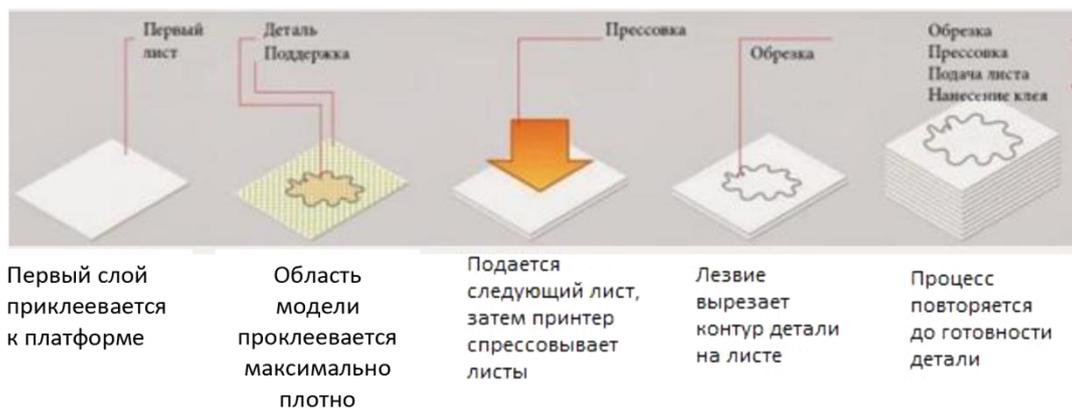


Рисунок 2.25. Схема процесса ламинирования методом селективного осаждения

Новый лист бумаги подается в принтер из лотка для бумаги и направляется ровно на то место, куда было нанесено клеящее средство. Сборочная пластина перемещается вверх к раскаленной пластине, после чего к составным частям применяется давление. За счет этого давления достигается прочная связь между двумя листами бумаги.

Когда сборочная пластина возвращается на свое первоначальное положение, регулируемое лезвие из карбида вольфрама разрезает лист бумаги и в то же время следит за контуром объекта для создания формы будущей модели. После того как вся эта последовательность выполнена, устройство начинает наносить следующий слой клея. Весь процесс продолжается до момента, пока все листы не будут разрезаны и склеены между собой, а модель не примет свой окончательный вид. После того как нанесение последнего слоя завершено, модель может быть извлечена из сборочной камеры.

Главное преимущество ламинирования методом селективного осаждения становится очевидным, когда вы избавляетесь от ненужных, поддерживающих модель частей. Этот процесс называется “извлечение”. В связи с тем, что клеящее вещество наносится выборочно, между составными частями модели связь более прочная, чем между поддерживающими материалами. Кроме того, для облегчения процесса извлечения модели поддерживающий материал “разваливается” на маленькие составные части, похожие на игральные кости; это предотвращает разрушение хрупкой 3D-модели.

Принтеры Msoг отличаются своей неприхотливостью: для извлечения 3D -моделей из-под поддерживающей структуры погружать детали в токсичные химические вещества или использовать острые инструменты вовсе не обязательно. При печати на принтере компании Msoг модель не раскрошится и не разрушится. На выходе 3D -модель представляет собой прочную и жесткую структуру. Так как модель создается путем плотного сжатия листов бумаги, конечный продукт - это, практически, воссозданное дерево. Модель генерирует тепло, вызывает приятные тактильные ощущения.

Модель можно будет обработать любым желаемым способом для того, чтобы она отвечала всем необходимым требованиям.

2.9.Струйная трехмерная печать (3DP)

Струйная трехмерная печать (3DP) - один из старейших методов аддитивного производства. Эта технология была разработана в Массачусетском Технологическом институте (MIT) в 1993 году. Технология получила коммерческое распространение в 1995 году с помощью компании Z Corporation, приобретенной корпорацией 3D-Systems в 2012 году [1].

Как и другие технологии аддитивного производства, струйная трехмерная печать подразумевает послойное построение физических объектов на основе цифровой трехмерной модели. В качестве расходных материалов используются различные порошки, гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси, наносимые последовательными тонкими

слоями. Контуры модели вычерчиваются печатной головкой, наносящей связующий материал. Таким образом, частицы каждого нового слоя склеиваются между собой и с предыдущими слоями до образования готовой трехмерной модели (Рисунок 2.26).

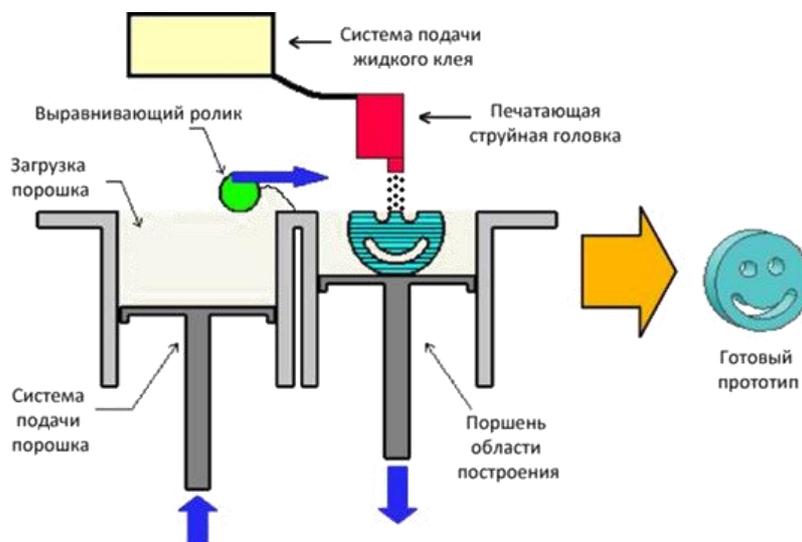


Рисунок 2.26. Схема процесса струйной трехмерной печати

Оригинальные устройства использовали в качестве расходного материала гипс, что обусловило обиходное название технологии - «гипсовая трехмерная печать». Печатные головки экструдируют воду, склеивающую материал. Со временем технология прогрессировала и теперь включает возможность добавки различных агентов: красителей, уплотнителей и пр.

В настоящее время помимо гипса используются различные материалы, включая пластики, песчаные смеси и даже металлы. Технология способна создавать трехмерные модели из любого порошкового материала, а добавление красителей в связующий материал позволяет осуществлять цветную печать.

Практичность же моделей зависит от последующей обработки. Например, изделия, созданные из металлического порошка, будут обладать видом, схожим с необработанными металлическими изделиями. С другой стороны, их прочность будет напрямую зависеть от связующего материала и, как правило, будет невысока. Для улучшения механических свойств можно прибегнуть к обжигу с помощью гончарных печей. Во избежание деформации моделей обжиг, как правило, подразумевает не спекание, а выплавку изначального связующего материала с пропиткой более твердой субстанцией. Например, возможна выплавка или выжигание связующих пластиков с одновременной пропиткой стальной модели медью или бронзой.

Готовые изделия будут обладать высокой долговечностью, но их механические характеристики все равно не будут достаточными для применения в качестве функциональных прототипов деталей механизмов. Как правило, модели, изготовленные по технологии 3DP, используются в качестве сувениров, украшений или макетов, любых моделей высокой геометрической сложности, не подверженных высоким механическим нагрузкам.

Наряду с высокой универсальностью в плане используемых материалов, метод 3DP отличается отсутствием необходимости печати опорных структур. Такие популярные методы, как FDM или SLA, требуют постройки дополнительных элементов, называемых «опорами» или «поддержками», для стабилизации навесных элементов печатаемых моделей. В противном случае существует реальная возможность провисания слоев и деформации моделей, а в крайних случаях печать вообще невозможна ввиду отсутствия необходимой

опорной поверхности. В случае с 3DP необходимость создания опорных структур отпадает, так как каждый слой порошка служит естественной опорой для следующего слоя. Стоит отметить и экономичность технологии: остаточный порошок может быть собран из рабочей камеры по завершении печати и использован в следующем производственном цикле.

Технология 3DP пользуется широкой популярностью и применяется в самых различных отраслях, зачастую теряя свое оригинальное обозначение. Так, в сфере биопечати используется вариант технологии, известный как «**капельная/струйная печать**», или **DOD** (Drop on Demand). Этот метод применяется для послойного нанесения живых клеток с целью построения органических тканей. Одним из наиболее ярких примеров использования технологии 3DP стало создание кондитерских принтеров Chef Jet, строящих трехмерные съедобные модели из сахаросодержащих продуктов, склеивая частицы материала водой, наподобие оригинальных «гипсовых» принтеров.

2.10. Электронно-лучевая плавка (проволочная) (EBF)

Изготовление произвольных форм электронно-лучевой плавкой (EBF) - новаторский метод аддитивного производства, разработанный Исследовательским центром NASA в Лэнгли (LaRC) под руководством Карен Тамингер [1]. Технология EBF нацелена на аддитивное производство комплексных моделей с пониженным по сравнению с традиционными методами расходом материалов и практическим отсутствием необходимости механической обработки. Разработка технологии ведется на протяжении более чем десятилетия в сотрудничестве с другими исследовательскими центрами NASA (JSC, GRC, GSFC и MSFC), федеральными агентствами и частной аэрокосмической промышленностью США. NASA надеется использовать EBF для производства металлических частей в условиях отсутствия гравитации. Метод использует электронные пучки высокой мощности для последовательного наплавления материалов в форме металлической проволоки. Технологические особенности электронно-лучевой плавки, наряду с экологичностью и эффективностью, делают процесс привлекательным для использования в космосе.

Концепция EBF основана на постройке «практически готовых форм» (Near-net-shape в англоязычной терминологии). Это означает, что изделия создаются на основе трехмерных цифровых моделей с настолько высокой точностью, что механическая обработка и доводка изделий практически не требуются. Современные производственные методы с использованием программного управления основываются на обработке трехмерной цифровой модели для создания алгоритмов, используемых в машинной обработке (т.н. G-code). Алгоритмы служат для определения траектории движения режущих инструментов в процессе создания готового изделия из болванки.

В случае с EBF процесс имеет прямо противоположное направление: те же самые цифровые модели используются для выработки производственных алгоритмов, регулирующих не удаление лишней массы, а нанесение необходимого материала.

Технология использует электронные излучатели высокой мощности в вакуумной камере для плавки металла. Электронный пучок передвигается по рабочей поверхности, повторяя контуры цифровой модели, в то время как металлическая проволока постепенно подается в точку фокусирования пучка. Расплавленный материал немедленно застывает, формируя прочные слои заданной модели. Процесс повторяется до построения цельной модели, требующей лишь минимальной обработки внешней поверхности.

Технология EBF позволяет создавать объекты размером от нескольких миллиметров до нескольких метров. Практические ограничения по объему построения накладываются физическими размерами вакуумной рабочей камеры и количеством доступного расходного материала. В качестве расходных материалов могут применяться практически любые металлические сплавы.

2.11. Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)

Прямое лазерное спекание металлов (DMLS) - технология аддитивного производства металлических изделий, разработанная компанией EOS из Мюнхена [1]. Технологию DMLS зачастую путают со схожими технологиями выборочного лазерного спекания (Selective Laser Sintering, или SLS) и выборочной лазерной плавки (Selective Laser Melting, или SLM).

Процесс печати включает использование трехмерных моделей в формате STL в качестве чертежей для построения физических моделей. Трехмерная модель подлежит цифровой обработке для виртуального разделения на тонкие слои с толщиной, соответствующей толщине слоев, наносимых печатным устройством. Готовый «построечный» файл используется как набор чертежей во время печати. В качестве нагревательного элемента для спекания металлического порошка используются оптоволоконные лазеры относительно высокой мощности - порядка 200 Вт. Некоторые устройства используют более мощные лазеры с повышенной скоростью сканирования (т.е. передвижения лазерного луча) для более высокой производительности. Как вариант возможно повышение производительности за счет использования нескольких лазеров.

Порошковый материал подается в рабочую камеру в количествах, необходимых для нанесения одного слоя. Специальный валик выравнивает поданный материал в ровный слой и удаляет излишний материал из камеры, после чего лазерная головка спекает частицы свежего порошка между собой и с предыдущим слоем согласно контурам, определенным цифровой моделью. После завершения вычерчивания слоя процесс повторяется: валик подает свежий материал, и лазер начинает спекать следующий слой (Рисунок 2.27).

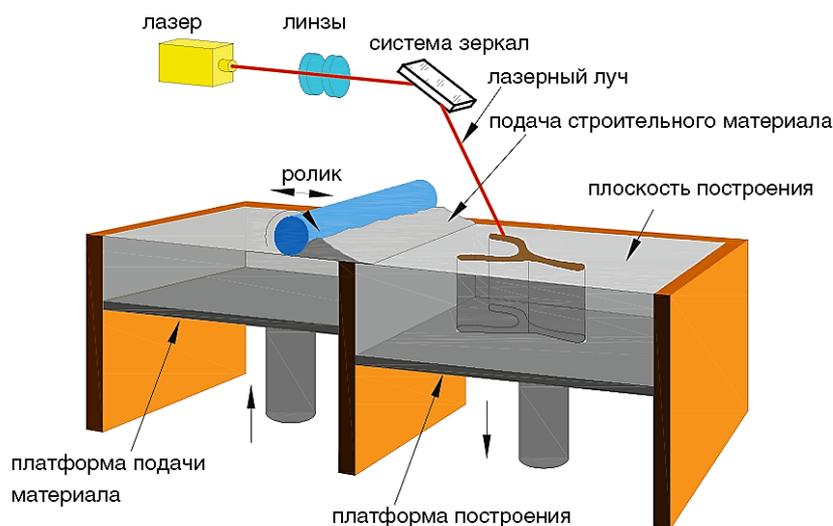


Рисунок 2.27. Схема процесса прямого лазерного спекания

Привлекательной особенностью этой технологии является очень высокое разрешение печати - в среднем около 20 микрон. Для сравнения: типичная толщина слоя в любительских и бытовых принтерах, использующих технологию послойного наплавления, составляет порядка 100 микрон.

Другой интересной особенностью процесса является отсутствие необходимости построения опор для нависающих элементов конструкции. Неспечённый порошок не удаляется во время печати, а остается в рабочей камере. Таким образом, каждый последующий слой имеет опорную поверхность. Кроме того, неизрасходованный материал может быть собран из рабочей камеры по завершении печати и использован заново. Производство методом прямого лазерного спекания можно считать фактически

безотходным, что немаловажно при использовании дорогих материалов, например драгоценных металлов.

Одним из важных условий при лазерной печати является создание защитной среды, предотвращающей окисление порошка. Для выполнения этого условия используют аргон или азот. Однако применение азота как инертного газа несколько ограничено из-за возможности образования нитридов (например, нитридов алюминия или титана при изготовлении изделий из алюминиевых и титановых сплавов), которые приводят к понижению пластичности материала.

Технология практически не имеет ограничений по геометрической сложности построения, а высокая точность исполнения минимизирует необходимость механической обработки напечатанных изделий.

Технология прямого лазерного спекания обладает несколькими достоинствами по сравнению с традиционными методами производства. Наиболее очевидным ее достоинством является возможность быстрого производства геометрически сложных деталей без необходимости механической обработки («субтрактивных» методов фрезеровки, сверления и пр.). Производство практически безотходно, что выгодно отличает прямое лазерное спекание от субтрактивных технологий. Технология позволяет создавать несколько моделей одновременно с ограничением лишь по размеру рабочей камеры. Построение моделей занимает примерно несколько часов, что несоизмеримо выгоднее, чем литейный процесс, который может занимать до нескольких месяцев с учетом полного производственного цикла. С другой стороны, детали, произведенные лазерным спеканием, не обладают монолитностью, а потому не достигают тех же показателей прочности, что и отлитые образцы или детали, произведенные субтрактивными методами.

Прямое лазерное спекание активно используется в промышленности ввиду возможности построения внутренних структур цельных деталей, недоступных по сложности традиционным методам производства. Детали со сложной геометрией могут быть выполнены целиком, а не из составных частей, что благоприятно влияет на качество и стоимость изделий. Так как прямое лазерное спекание не требует специальных инструментов (например, литейных форм) и не предполагает образования большого количества отходов (как в случае с субтрактивными методами), производство мелкосерийных партий с помощью этой технологии значительно выгодней, чем традиционными методами.

Технология прямого лазерного спекания применяется для производства готовых изделий малого и среднего размера в различных отраслях, включая аэрокосмическую, стоматологическую, медицинскую и другие (Рисунок 2.28). Типичный размер области построения существующих установок составляет 250x250x250 мм, хотя технологических ограничений размеров не существует это лишь вопрос стоимости устройства. Прямое лазерное спекание используется для быстрого прототипирования, что сокращая время разработки новых продуктов, а также в производстве, что позволяет уменьшать себестоимость мелких партий и упрощать сборку изделий сложной геометрической формы.



Рисунок 2.28. Изделия, полученные по технологии прямого лазерного спекания

Северо-западный политехнический университет Китая использует DMLS-системы для производства элементов конструкции самолетов. Исследования, проведенные EADS, также указывают на уменьшение себестоимости и отходов при использовании технологии

DMLS для производства сложных конструкций в единичных экземплярах или мелкими партиями. 5 сентября 2013 года Илон Маск опубликовал фотографии детали ракетного двигателя Super Draco, созданной из никель-хромового жаропрочного сплава Inconel с помощью принтера EOS.

В качестве расходных материалов могут использоваться практически любые металлы и сплавы в порошковой форме. На сегодняшний день успешно применяется нержавеющая сталь, кобальт-хромовые сплавы, титан и прочие материалы.

2.12. Непрямое лазерное спекание металлов (IMLS)

Процесс, получивший название непрямого лазерного спекания металлов (IMLS), был разработан компанией DTMcorp of Austin в 1995 году [1]. С 2001 года DTMcorp принадлежит компании 3D-Systems. В процессе непрямого лазерного спекания используют смесь порошка и полимера или порошок, покрытый полимером, где полимер выступает в роли связки и обеспечивает необходимую прочность для проведения дальнейшей термической обработки. На стадии термической обработки проводятся отгонка полимера, спекание каркаса и пропитка пористого каркаса металлом-связкой, в результате которой получается готовое изделие.

Для непрямого лазерного спекания можно использовать порошки как металлов, так и керамики или их смесей. Приготовление смеси порошка с полимером проводят механическим смешиванием, при этом содержание полимера составляет около 2-3 % (по массе), а в случае использования порошка, покрытого полимером, толщина слоя на поверхности частицы составляет около 5 мкм. В качестве связки используют эпоксидные смолы, жидкое стекло, полиамиды и другие полимеры. Температура отгонки полимера определяется температурой его плавления и разложения и в среднем составляет 400-650 °С. После отгонки полимера пористость изделия перед пропиткой составляет около 40 %.

При пропитке печь нагревают на 100-200 °С выше точки плавления пропитываемого материала, поскольку с повышением температуры уменьшается краевой угол смачивания и понижается вязкость расплава, что благоприятно влияет на процесс пропитки.

Обычно пропитку будущих изделий проводят в засыпке из оксида алюминия, которая играет роль поддерживающего каркаса, поскольку в период от отгонки полимера до образования прочных межчастичных контактов существует опасность разрушения или деформации изделия. Защиту от окисления организуют с помощью создания в печи инертной или восстановительной среды.

Для пропитки можно использовать довольно разнообразные металлы и сплавы, которые удовлетворяют следующим условиям. Материал для пропитки должен характеризоваться незначительным межфазным взаимодействием, или его полным отсутствием, малым краевым углом смачивания и иметь температуру плавления ниже, чем у основы. Например, в случае если компоненты взаимодействуют между собой, то в процессе пропитки могут происходить нежелательные процессы, такие, как образование более тугоплавких соединений или твердых растворов, что может привести к остановке процесса пропитки или негативно сказаться на свойствах и размерах изделия. Обычно для пропитки металлического каркаса используют бронзу, при этом усадка изделия составляет 2-5 %.

2.13. Электронно-лучевая плавка металлов (EBM)

Электронно-лучевая плавка (electron beam melting, или EBM) - метод аддитивного производства металлических изделий [1]. Данная технология зачастую классифицируется как метод быстрого производства. Электронно-лучевая плавка (EBM) схожа с выборочной лазерной плавкой (SLM). Главное отличие заключается в использовании электронных

излучателей (т.н. электронных пушек) вместо лазеров в качестве источников энергии для плавки. В основе технологии лежит использование электронных пучков высокой мощности для сплавления металлического порошка в вакуумной камере с образованием последовательных слоев, повторяющих контуры цифровой модели (Рисунок 2.29). В отличие от технологий спекания электронно-лучевая плавка позволяет создавать детали особо высокой плотности и прочности.

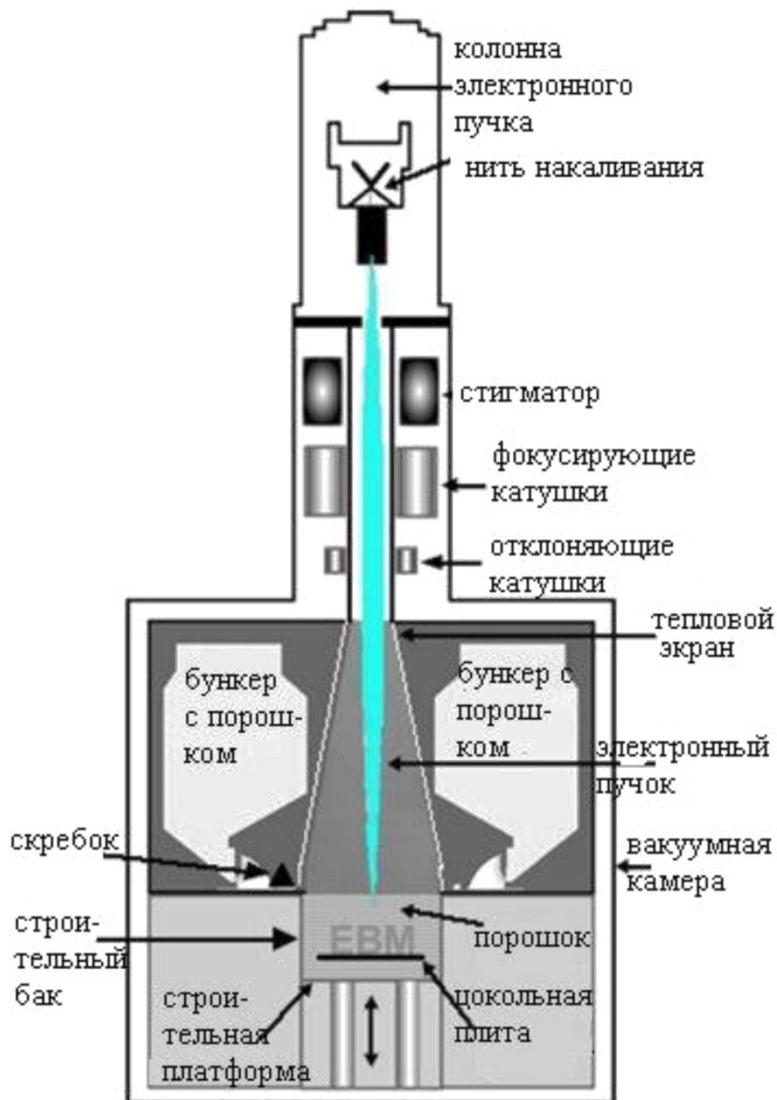


Рисунок 2.29. Схема процесса электронно-лучевой плавки

Этот метод производства деталей произвольных форм позволяет создавать металлические модели высокой плотности из металлического порошка. Готовые изделия практически не отличаются от литых деталей по механическим свойствам. Устройство считывает данные с файла, содержащего трехмерную цифровую модель, и наносит последовательные слои порошкового материала. Контуров слоев модели вычерчиваются электронным пучком, плавящим порошок в местах соприкосновения. Плавка проводится в вакуумных рабочих камерах, что позволяет работать с материалами, чувствительными к окислации, например с чистым титаном.

Расходные материалы состоят из чистого металлического порошка без связующего полимера, а готовые модели не отличаются пористостью. Таким образом, не требуется обжигание напечатанной модели для достижения необходимой механической прочности. Этот аспект позволяет классифицировать электронно-лучевую плавку в одну группу с

выборочной лазерной плавкой (SLM) и противопоставить технологиям выборочного лазерного спекания (SLS) и прямого лазерного спекания металлов (DMLS), зачастую требующим обжига после печати для достижения максимальных прочностных характеристик. В сравнении с методами SLS, SLM и DMLS электроннолучевая плавка характеризуется более высокой скоростью построения за счет более высокой мощности излучателей и электронного, а не электромеханического отклонения пучков.

Электроннолучевая плавка проводится при повышенных фоновых температурах, достигающих 700-1000 °С, что позволяет создавать детали, не страдающие от остаточного механического напряжения, вызываемого градиентом температур между уже охлажденными и еще горячими слоями. Кроме того, полная плавка расходного порошка позволяет производить монолитные изделия отсюда максимальная прочность и отсутствие необходимости обжига. Технология была разработана и впервые применена шведской компанией Arcam AB.

Использование в качестве расходных материалов титановых сплавов позволяет применять технологию EBM для производства медицинских имплантатов. Начиная с 2007 года две европейские компании, Adler Ortho и Lima Corporate, а также американская компания Exactech используют технологию электронно лучевой плавки для производства ацетабулярных чашек (имплантатов тазобедренного сустава).

Технология получила применение в аэрокосмической отрасли: Boeing, Lockheed Martin и NASA используют технологию электроннолучевой плавки для производства деталей реактивных и ракетных двигателей, а также несущих элементов конструкции летательных аппаратов.

2.14. Селективное лазерное плавление (SLM)

Селективное (выборочное) лазерное плавление (SLM) - метод аддитивного производства, использующий лазеры высокой мощности (как правило, иттербиевые волоконные лазеры) для создания трехмерных физических объектов за счет плавки металлических порошков [1].

Разработка технологии селективного лазерного спекания велась В. Майнерсом и К. Виссенбахом из Института лазерной техники (ILT) Общества Фраунгофера (г. Ахен) совместно с Д. Шварце и М. Фокеле из компании F&S Stereolithographietechnik GmbH (г. Падерборн).

В 2000 году компания F&S заключила коммерческое соглашение с MCP HEK GmbH (впоследствии переименованной в MTT Technology GmbH, а затем в SLM Solutions GmbH). На сегодняшний день Дитер Шварце сотрудничает с SLM Solutions GmbH, а Маттиас Фокеле основал конкурирующую компанию ReaLizer GmbH.

Процесс печати начинается с разделения цифровой трехмерной модели на слои толщиной от 20 до 100 микрон. Готовый файл в стандартном формате STL используется в качестве чертежей для построения физической модели.

Производственный цикл состоит из нанесения тонкого слоя порошка на рабочую поверхность, как правило, металлический стол, способный передвигаться в вертикальном направлении. Процесс печати протекает в рабочей камере, заполняемой инертными газами (например, аргоном). Отсутствие кислорода позволяет избежать оксидации расходного материала, что делает возможной печать такими материалами, как титан. Каждый слой модели сплавляется, повторяя контуры слоев цифровой модели. Плавка проводится с помощью лазерного луча, направляемого по осям X и Y двумя зеркалами с высокой скоростью отклонения. Мощность лазерного излучателя достаточно высока для плавки частиц порошка в гомогенный материал (Рисунок 2.30).

Технология выборочной лазерной плавки применяется для построения объектов сложной геометрической формы, зачастую с тонкими стенками и полостями. Возможность комбинирования гомогенных и пористых структур в одном объекте полезна при создании

имплантатов, например ацетабулярных чашек или других ортопедических имплантатов с пористой поверхностью, способствующей остео-интеграции (сращиванию с костной тканью). Кроме того, селективное лазерное плавление успешно применяется в аэрокосмической отрасли, позволяя создавать высокопрочные элементы конструкций, недостижимые по геометрической сложности для традиционных механических методов изготовления и обработки (фрезеровки, резки и т.д.). Качество готовых изделий настолько высоко, что механическая обработка готовых моделей почти не требуется. Побочным положительным эффектом служит экономия материалов, так как селективное лазерное плавление в силу своей специфики является практически безотходным производством.

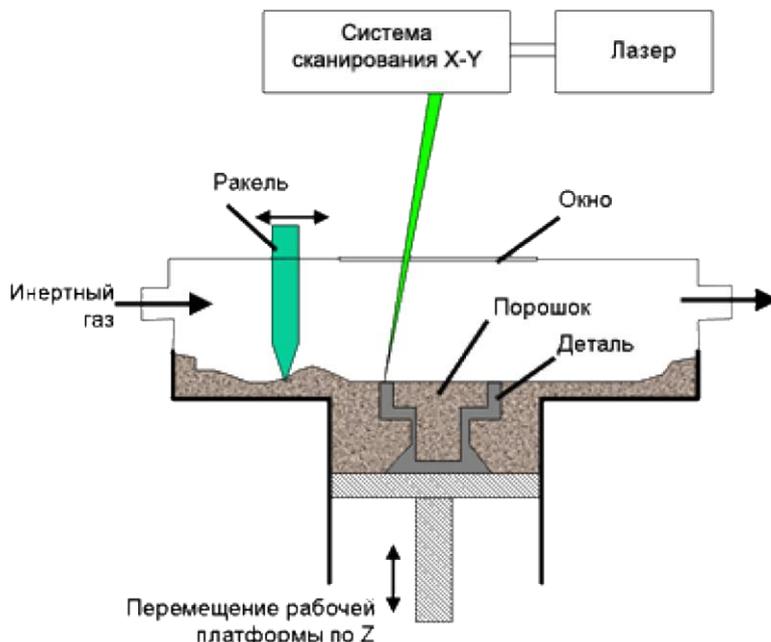


Рисунок 2.30. Схема процесса селективного лазерного плавления

В ходе испытаний NASA было установлено, что детали для ракетных двигателей J-2X и RS-25, изготовленные из никелевых сплавов методом SLM, несколько уступают по плотности материала аналогам, изготовленным литьем с последующей сваркой компонентов. С другой стороны, отсутствие сварочных швов благоприятно влияет на прочность изделий.

2.15. Селективное тепловое спекание (SHS)

Селективное (выборочное) тепловое спекание (SHS) - метод аддитивного производства [1]. Технология основана на плавке слоев термопластического или металлического порошка с помощью теплового излучателя.

По окончании формирования слоя рабочая платформа передвигается вниз на дистанцию, соответствующую толщине одного слоя, после чего новый слой порошка наносится с помощью автоматизированного ролика, а затем проводится спекание нового слоя по контурам, заданным цифровой трехмерной моделью (Рисунок 2.31). Лучше всего технология SHS подходит для производства недорогих функциональных прототипов.

Селективное тепловое спекание схоже с селективным лазерным спеканием (SLS). Единственное существенное различие между этими двумя методами заключается в использовании тепловой печатающей головки вместо лазерной. Такое решение позволяет снизить стоимость и габариты печатающих устройств, вплоть до возможности создания настольных принтеров. С другой стороны, энергетическая отдача SHS-устройств мала по сравнению с лазерными 3D-принтерами, что существенно ограничивает выбор материалов.

Одним из основных преимуществ метода теплового спекания является то, что для

определенной длины волны ИК-излучения всегда существует возможность подобрать два вида материала: один из которых будет пропускать тепло, а другой будет его поглощать. Таким образом, комбинируя эти материалы при производстве изделия можно достигать значительной сложности и многообразия его форм.

Селективное тепловое спекание - это настоящий прорыв в скоростной трехмерной печати. Важно подчеркнуть, что модель формируется из порошка, причем весь неиспользованный порошок можно использовать повторно. Данная технология позволяет изготавливать модели самых сложных геометрических форм, а также позволяет печатать несколько деталей одновременно.

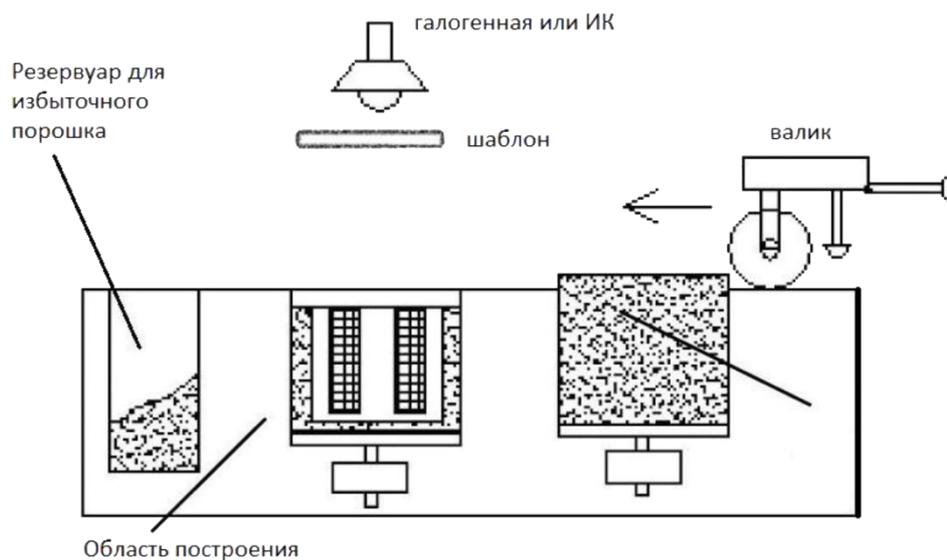


Рисунок 2.31. Схема процесса селективного теплового спекания

Как правило, в качестве расходных материалов используются термопластичные полимеры или достаточно легкоплавкие металлы. В последнем случае модели зачастую требуют дополнительного обжига для повышения прочности.

2.16. Селективное лазерное спекание (SLS)

Селективное (выборочное) лазерное спекание (SLS) - метод аддитивного производства, используемый для создания функциональных прототипов и мелких партий готовых изделий [1]. Технология основана на последовательном спекании слоев порошкового материала с помощью лазеров высокой мощности. Метод SLS зачастую ошибочно принимают за схожий процесс, называемый выборочной лазерной плавкой (SLM). Разница заключается в том, что SLS обеспечивает лишь частичную плавку, необходимую для спекания материала, в то время как выборочная лазерная плавка подразумевает полную плавку, необходимую для построения монолитных моделей.

Технология выборочного (селективного) лазерного спекания (SLS) была разработана Карлом Декардом и Джозефом Биманом из Университета Техаса в Остине в середине 1980-х годов. Исследования финансировались Агентством передовых оборонных исследовательских проектов США (DARPA). Впоследствии Декард и Биман были вовлечены в компанию DTM, образованную для продвижения технологии SLS на рынок. В 2001 году DTM была выкуплена конкурирующей компанией 3D-Systems. Последний из патентов по технологии SLS был заявлен 28 января 1997 года. Его срок действия истек 28 января 2014 года, что делает технологию общедоступной.

Аналогичный метод был запатентован Р. Ф. Хаусхолдером в 1979 году, но не получил коммерческого распространения.

Технология SLS подразумевает использование одного или нескольких лазеров (как правило, углекислотных) для спекания частиц порошкообразного материала до образования трехмерного физического объекта (Рисунок 2.32). В качестве расходных материалов используются пластики, металлы, керамика или стекло. Спекание производится за счет вычерчивания контуров, заложенных в цифровой модели (т.н. «сканирования») с помощью одного или нескольких лазеров. По завершении сканирования рабочая платформа опускается и наносится новый слой материала. Процесс повторяется до образования полной модели.

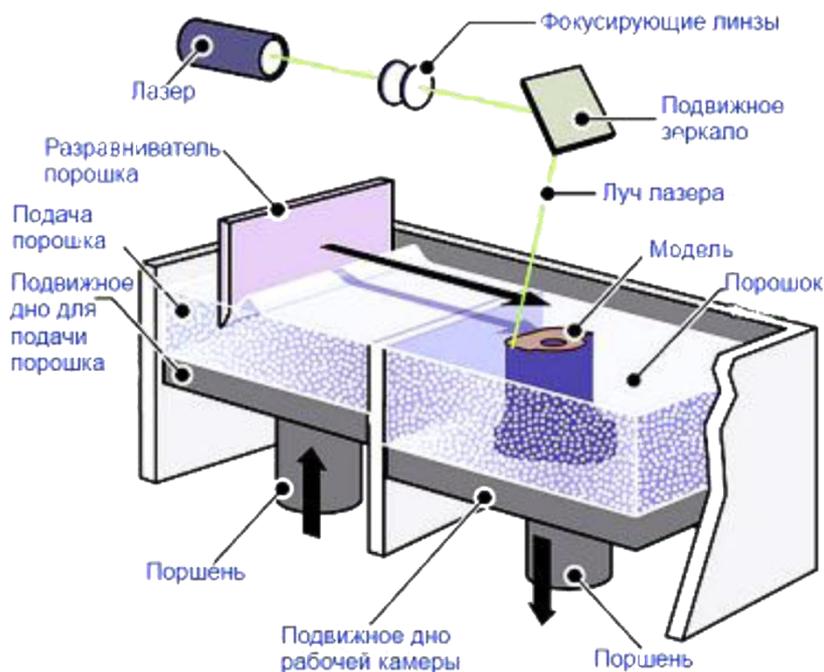


Рисунок 2.32. Схема процесса селективного лазерного спекания

Так как плотность изделия зависит не от продолжительности облучения, а от максимальной энергии лазера, в основном используются пульсирующие излучатели. Перед началом печати расходный материал подогревается до температуры чуть ниже точки плавления, чтобы облегчить процесс спекания.

В отличие от таких методов аддитивного производства, как стереолитография или моделирование методом послойного наплавления, селективное лазерное спекание не требует построения опорных структур. Навесные части модели поддерживаются неизрасходованным материалом. Такой подход позволяет добиться практически неограниченной геометрической сложности изготавливаемых моделей.

Некоторые SLS-устройства используют однородный порошок (как при прямом лазерном спекании металлов), производимый с помощью барабанношаровых мельниц, но в большинстве случаев используются композитные гранулы с тугоплавким ядром и оболочкой из материала с пониженной температурой плавления.

В сравнении с другими методами аддитивного производства селективное лазерное спекание отличается высокой универсальностью в плане выбора расходных материалов. Сюда входят различные полимеры (например, нейлон или полистирол), металлы и сплавы (сталь, титан, драгоценные металлы, кобальт-хромовые сплавы и др.), а также композиты и песчаные смеси.

Технология селективного лазерного спекания получила широкое распространение по всему миру благодаря способности производить функциональные детали сложной геометрической формы. Несмотря на то, что технология создавалась для быстрого

прототипирования, в последнее время селективное лазерное спекание применяется для мелкосерийного производства готовых изделий (Рисунок 2.33). Достаточно неожиданным, но интересным применением SLS стало использование технологии для создания предметов искусства.



Рисунок 2.33. Изделие, полученное по методу SLS

В то же время твердофазное селективное лазерное спекание имеет ряд недостатков. Так для более полного протекания объемной и поверхностной диффузии, вязкого течения и других процессов, имеющих место при спекании порошка, требуется относительно длительная выдержка под лазерным излучением. Это приводит к длительной работе лазера и малой производительности процесса, что делает этот процесс экономически нецелесообразным. Помимо этого, возникают сложности с поддержанием температуры процесса в интервале между точкой плавления и температурой твердофазного спекания.

Преимуществом твердофазного селективного лазерного спекания является возможность использования более широкого круга материалов для изготовления изделий.

ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИИ 3D СКАНИРОВАНИЯ

3.1 Времяпролетные сканеры на основе технологии Time-of-Flight

3D-сканирование применяется во многих сферах: от строительства и метрологии до археологии и медицины. Существует несколько технологий, которые можно условно разделить на две основные категории — сканеры ближнего и дальнего действия, однако ни одна из них не является универсальной. Для каждой сферы подходит определенная технология или их комбинация [6-11].

3D-сканеры ближнего действия в основном используются при рабочих расстояниях до нескольких метров (навигация, мониторинг людей, обход препятствий, мобильные роботы и т. д.). В таких случаях часто просто необходимо понять, присутствует ли объект, и установить его положение.

В других сферах, например — в автоматизированных системах обработки материалов, работы проводятся на умеренных расстояниях в 1–3 метра и требуют более точных измерений (около 1–5 мм). При таких условиях подходящим решением может быть визуализация времени пролета - Time-of-Flight (Рисунок 3.1).

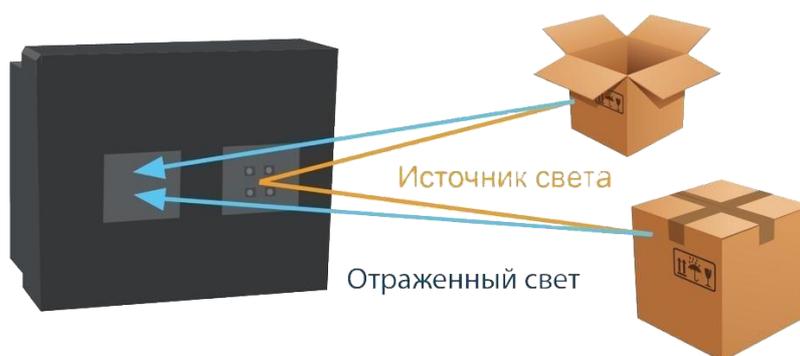


Рисунок 3.1 Времяпролетный принцип (Time-of-Flight)

Времяпролетный принцип достаточно прост: устройство измеряет время, необходимое для того, чтобы излучаемый устройством лазерный свет добрался до конкретного объекта и, отразившись, вернулся к сенсору, для каждой точки изображения.

Поскольку скорость света (c) – величина постоянная, измерив время пролёта лазерного луча туда и обратно, можно определить расстояние, на которое переместился свет, которое будет в два раза больше расстояния между сканером и поверхностью объекта. Допустим, (t) – это время пролёта луча туда и обратно, тогда расстояние равняется $c(t/2)$. Точность времени пролёта лазерного луча 3D-сканера зависит от того, насколько точно мы можем измерить само время (t) : для преодоления лазером расстояния в 1 миллиметр необходимо приблизительно 3,3 пикосекунды (Рисунок 3.2).

Лазерный дальномер измеряет расстояние только до одной точки в заданном направлении. Поэтому девайс сканирует все поле зрения по отдельным точкам за раз, при этом меняя направление сканирования. Менять направление можно либо вращая сам прибор, либо посредством системы вращающихся зеркал. Зачастую используется второй метод, ведь он намного быстрее, точнее и легче в обращении. К примеру, времяпролетный 3D-сканер может измерить расстояние для 10 000 - 100 000 точек за секунду.

Например, в системах машинного зрения (автоматическое управление), сканеры на основе Lidar могут использоваться для создания карты окружающих их объектов путем излучения лазерного импульса, который сканируется по полю зрения устройства с

использованием движущегося зеркала. Излучаемый свет отражается от объектов и возвращается к датчику. Полученная информация содержит как отражательную способность объекта (затухание сигнала), так и информацию о временной задержке, которая используется для вычисления глубины с помощью времяпролетного принципа.

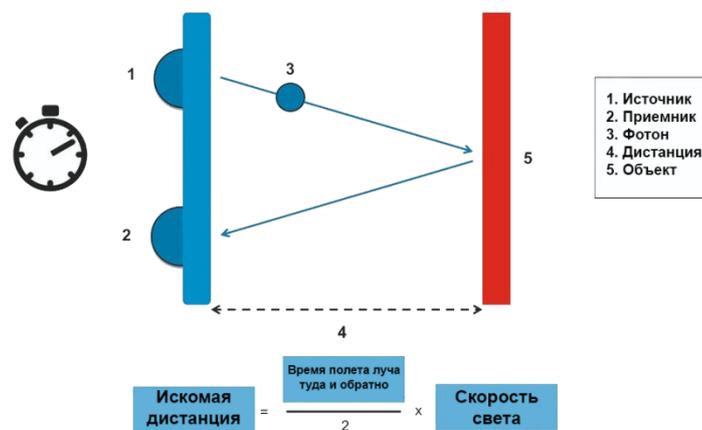


Рисунок 3.2 Расчет расстояния в технологии Time-of-Flight

Лазерные сканеры на основе времяпролетного принципа являются сканерами дальнего действия. Они бывают двух видов — *импульсные* и на основе *фазового сдвига*.

Сканеры на основе лазерных импульсов, также известные как времяпролетные сканеры, основаны на очень простой концепции: нам достоверно известна скорость света. Таким образом, если известна длительность времени, в течение которого лазер достигает объекта и отражается от датчика, легко вычисляется расстояние от датчика до объекта. Эти системы используют схемы, работающие с точностью до пикосекунд, чтобы измерить время, которое требуется миллионам импульсов лазера для возврата к датчику, и рассчитать расстояние. Вращая лазер и датчик (обычно с помощью зеркал), сканер может сканировать пространство до 360 градусов вокруг себя.

Импульсные сканеры рассчитаны на работу на расстояниях в несколько сотен метров, за счет мощного лазерного луча. При этом следует обязательно помнить, что излучение таких лазеров может быть опасным для глаз. Точность измерений достигает нескольких миллиметров, но с увеличением расстояния до объекта она снижается. Важно также учитывать то, что максимальная дальность измерения сканера, заявленная в описаниях и рекламных буклетах, рассчитана при отражении луча лазера от поверхности с высоким коэффициентом отражения. В реальных условиях коэффициент отражающей способности объекта почти всегда оказывается ниже (стена, борт карьера и т. д.), а вместе с этим уменьшается и максимальная дальность измерений.

Фазовые лазерные 3D-сканеры представляют собой еще один тип технологии 3D-сканеров, основанной на времяпролетном принципе, и концептуально работает аналогично импульсным сканерам. В дополнение к пульсации лазера, эти системы также модулируют мощность лазерного луча, и сканер сравнивает фазу отправленного и возвращенного к датчику сигнала (Рисунок 3.3). Измерения сдвига фаз обычно более точные, но фазовые сканеры не так удобны для сканирования на большие расстояния, как импульсные. Времяпролетный лазерный 3D-сканер с импульсной технологией может сканировать объекты на расстоянии до 1000 м, тогда как сканеры с фазовым сдвигом лучше подходят для сканирования объектов на расстоянии до 100 м.

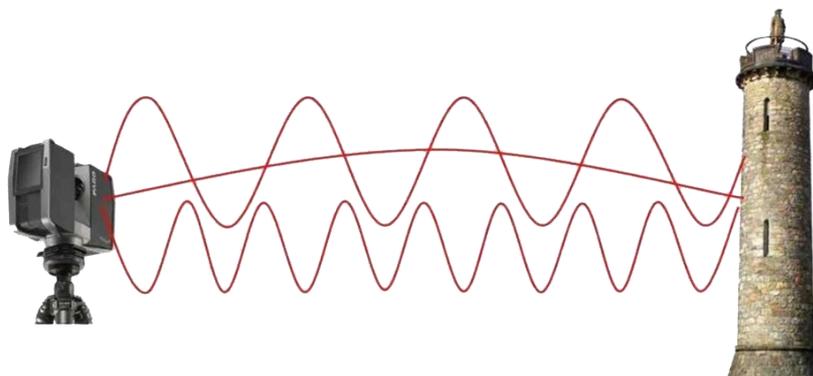


Рисунок 3.3 Фазовые лазерные 3Dсканеры

Фазовые сканеры используют безопасный для глаз лазер, при этом скорость измерений превышает скорость импульсных сканеров в 10-100 раз.

Ниже приведена сравнительная табл. 3.1 преимуществ и недостатков импульсных и фазовых лазерных сканеров.

Таблица 3.1 Преимущества и недостатки импульсных и фазовых лазерных сканеров

Тип сканера	Достоинства	Недостатки
Импульсный	дальность до 1000 м	<ul style="list-style-type: none"> – менее точные – более медленное получение данных – более шумные – опасны для глаз
Фазовый	<ul style="list-style-type: none"> – более точные – более быстрое получение данных – менее шумные – безопасны для глаз 	обычная дальность не более 100 м

Преимущества времяпролетных сканеров.

Суммируя информацию о принципе работы и различиях двух типов времяпролетных сканеров, выделим их основные преимущества.

- 3D-сканирование миллионов точек за одно сканирование — до 1 миллиона точек в секунду.
- Большая область сканирования (до 1000 метров).
- Хорошая точность и разрешение, в зависимости от размера объекта.
- Бесконтактный принцип работы для безопасного сканирования всех типов объектов.
- Портативность.

История и сферы применения времяпролетного принципа.

Первый случай применения времяпролетного принципа произошел в 1971 году, когда НАСА запустила ракету «Сатурн V», как первый шаг в лунной миссии Аполлона-15.

Технология лидар использовалась для съемки поверхности Луны с орбиты с высокой степенью детализации, которую не удавалось получить ранее. Этот принцип также использовался для картирования поверхности Марса и топологии Земли, а также для измерения планетарного расстояния, например — от Земли до Марса.

На фото — карта поверхности Луны, полученная с лидарных сканов Аполлона 15 (Рисунок 3.4).

Этот принцип также использовался для определения ущерба, нанесенного Королевским пожаром в Национальном лесу Эль-Дорадо в Калифорнии в 2014 году. Это помогло дать точные ответы на вопросы о серьезности и степени ущерба (Рисунок 3.5). Поскольку лидар можно использовать для картирования больших площадей, технология может быть полезна

для изучения окружающей среды.

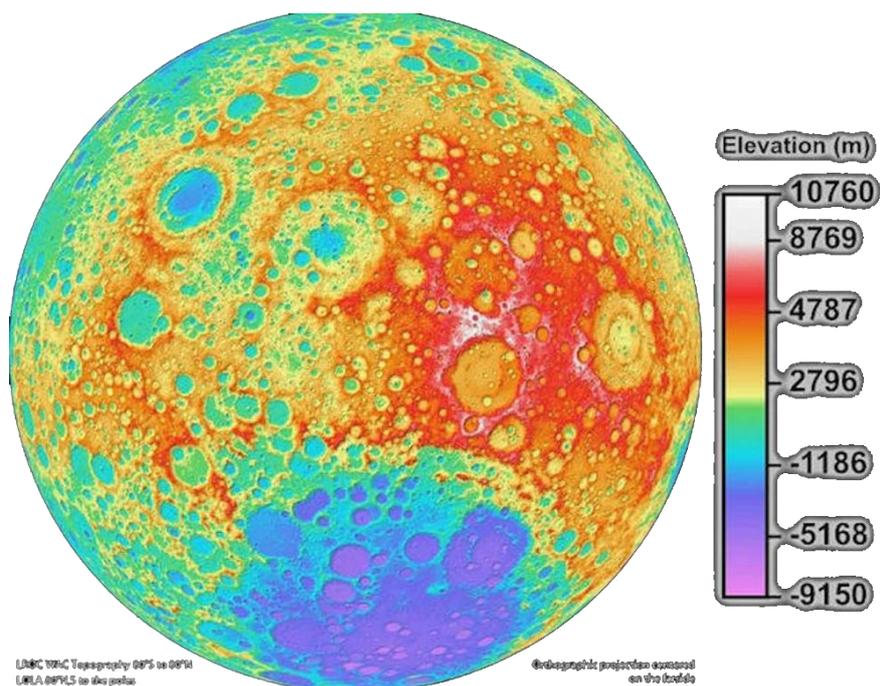


Рисунок 3.4 Карта поверхности Луны, полученная с лидарных сканов Аполлона 15

Например, лидар может быть использован для определения того, какие районы могут быть уязвимы в будущем, в случае таких бедствий как наводнения. Как и в случае с «Королевским пожаром», его также можно использовать для оценки ущерба после стихийного бедствия и определения того, на чем следует сосредоточить усилия по восстановлению.

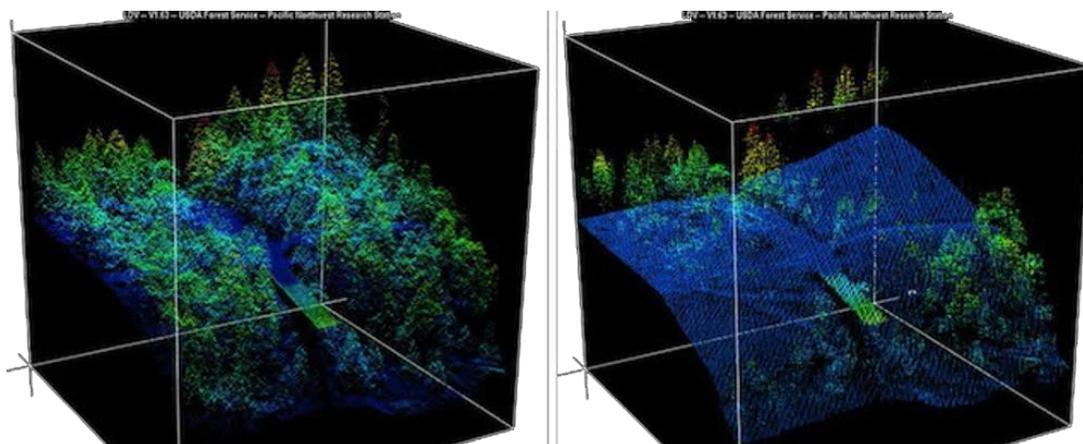


Рисунок 3.5 Оценка ущерба от пожара в Национальном лесу Эль-Дорадо в Калифорнии в 2014 году.

Лидар можно использовать не только для картирования, но и для поиска потерянных городов — обнаружения структур под густыми зарослями. Один из таких проектов нашел затерянный город в Мексике, в котором, вероятно, было столько же зданий, сколько на Манхэттене.

Как импульсные, так и фазовые лазерные 3D-сканеры отлично подходят для сканирования больших объектов, таких как здания, постройки, воздушные и морские суда, военные транспортные средства. Фазовые сканеры лучше работают на средних расстояниях и подходят для автомобилей (Рисунок 3.6), больших насосов и промышленного оборудования.

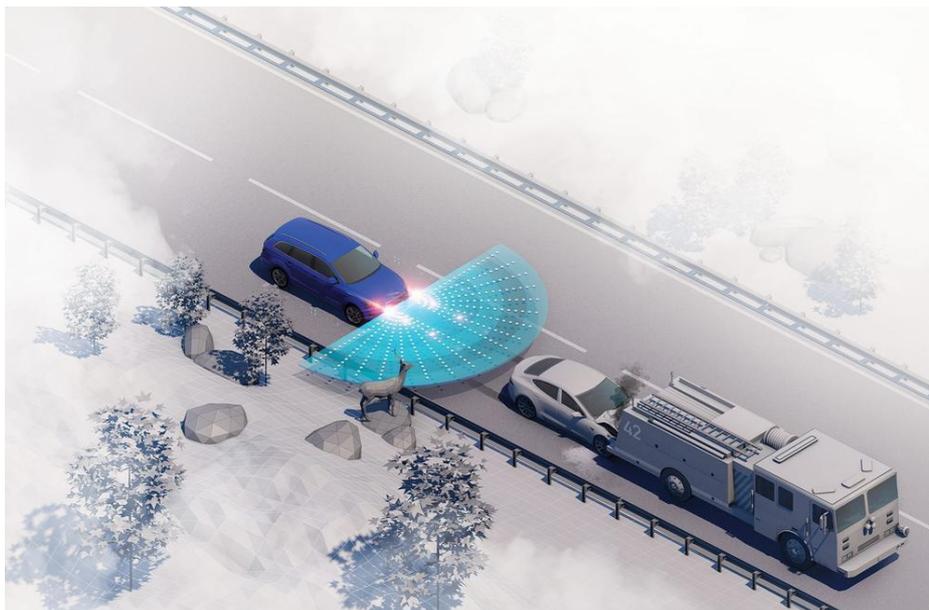


Рисунок 3.6 Лидар на автомобиле

Для небольших или низкобюджетных строительных проектов 3D-пролетная технология может быть непрактична, из-за ее стоимости. Такие сканеры предпочтительны для серьезных и крупных проектов, таких как картирование пойм (затопленных территорий) и зданий. Зачастую времяпролетные сканеры применяются для землеустроительных работ.

Миниатюрные лидары также используются для решения некоторых нишевых задач: при создании беспилотных и ассистирующих автомобилей, роботов.

3.2 Координатно-измерительные машины (КИМ, СММ)

Координатно-измерительные машины, называемые ещё СММ (coordinate measuring machine, КИМ) представляют собой крупногабаритные стационарные устройства, которые напоминают промышленные станки с ЧПУ, имеющие вместо шпинделя измерительную головку с рубиновым шариком на конце. Сканирование производится контактным способом: головка подводится к измеряемому объекту и проходит по его поверхности, регистрируя все перемещения [6-11].

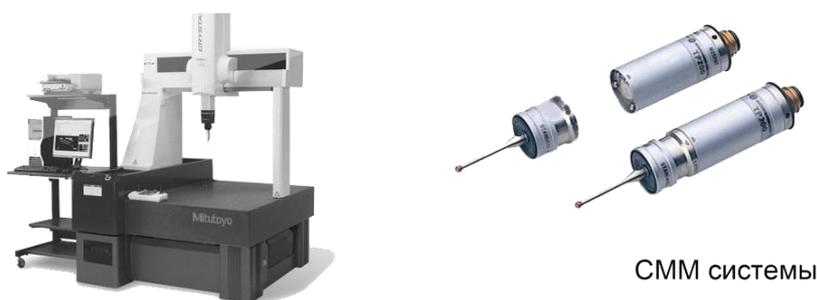


Рисунок 3.7 Координатно-измерительные машины

Также существуют портативные системы с подвижными “суставами”, в которых установлены высокоточные энкодеры. При перемещении сканирующего органа эти датчики фиксируют получаемые координаты, а компьютер, снабжённый специализированным программным обеспечением, выстраивает на основе полученных данных трехмерную модель изделия.

Технология контактного сканирования имеет ряд существенных ограничений, основные из которых таковы:

1. низкая, очень низкая скорость (кроме случаев, когда необходимы точные замеры лишь по немногим отдельным точкам);
2. проблематичность сканирования внутренних объёмов и отверстий малого диаметра;
3. стационарность установок и их большие габариты.

Контактные сканеры оказались неспособны конкурировать с бесконтактными, которые лишены указанных ограничений, и к настоящему времени вышли из употребления почти полностью. Немногие оставшиеся смогли удержаться на рынке лишь благодаря глубокой модернизации, обеспечившей существенное повышение мобильности, производительности и качества измерений.

3.3 Оптические 3D-сканеры со структурированным светом

Принцип работы оптических 3D-сканеров заключается в следующем: предметы подсвечиваются структурированным светом с помощью проектора и снимаются двумя (реже одной) камерами с разных ракурсов [6-11]. Сканируемый объект засвечивается узкой полосой света или световым паттерном: черно-белыми квадратами, расположенными по принципу шахматной доски, или “зёброй” — черно-белыми полосами. Деформация проецируемого рисунка при наложении на сканируемый объект дает информацию о глубине и кривизне поверхности, форме предмета (Рисунок 3.8).

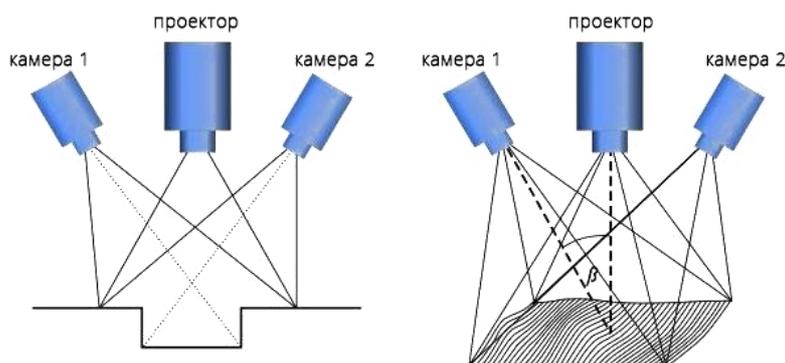


Рисунок 3.8 Принцип работы оптических 3D-сканеров

Камеры фиксируют искривления полученной картинки и на основе анализа полученных данных в ПО реконструируется 3D-модель сканируемого объекта (Рисунок 3.9).

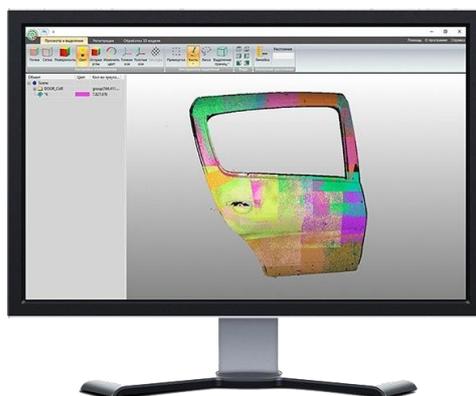


Рисунок 3.9 Реконструкция 3D-модели сканируемого объекта

Оптические 3D-сканеры бывают ручными и настольными: с поворотным столиком и без. Многие модели поддерживают цветное сканирование.

Достоинства оптических 3D-сканеров.

1. Оптические 3D-сканеры работают быстрее лазерных и способны получать информацию о цвете.
2. Средняя стоимость оптических сканеров ниже, чем стоимость лазерных аналогов.

Недостаток оптических сканеров на штативе:

1. Ограничение сканирования крупных объектов, для этого используют ручные сканеры и наклейки-маркеры. Это маленькие черно-белые метки, которые размещают на поверхности для создания опорных точек. Отсканированная по частям крупная деталь сшивается в единую 3D-модель.
2. Крупные формы, такие как здания и памятники, оптическими сканерами как правило не сканируют, т.к. это очень долго и трудозатратно, с этой задачей намного лучше справляются лазерные сканеры и фотограмметрические комплексы.
3. Хуже, чем лазерные 3D-сканеры, оптические устройства справляются со сканированием блестящих, прозрачных и черных предметов. Но в 90% случаев эта проблема решается с помощью использования матирующего спрея.

Сферы применения

Реверс-инжиниринг. Для создания проекта сложного объекта проще всего опираться на техническую документацию или чертежи разработчика. Однако в большинстве случаев доступ к такой информации закрыт. В этом случае используют реверс-инжиниринг (обратное проектирование). Технология разработана для создания модели физического объекта на основе исследования его параметров.

Сформированную при помощи 3D-сканирования САД-модель можно доработать с целью улучшения ее характеристик, например, повышения производительности, увеличения срока службы. Обратное проектирование востребовано во многих областях: от крупных промышленных и ремонтных предприятий до средних и небольших мастерских сервисного обслуживания, рестайлинга и других сферах.

В связи с активным использованием трехмерной печати реверс-инжиниринг становится все более популярным. Создать модель объекта при помощи 3D-сканера и распечатать его на 3D-принтере может даже пользователь, только начинающий знакомство с цифровыми технологиями.

Принципиальную схему обратного проектирования с использованием 3D-сканера можно изобразить следующим образом: 3D-сканирование физического образца, перевод полученного облака точек в полигональную 3D-модель, обработка модели в специальном программном обеспечении для перевода в САПР-формат (Рисунок 3.10).

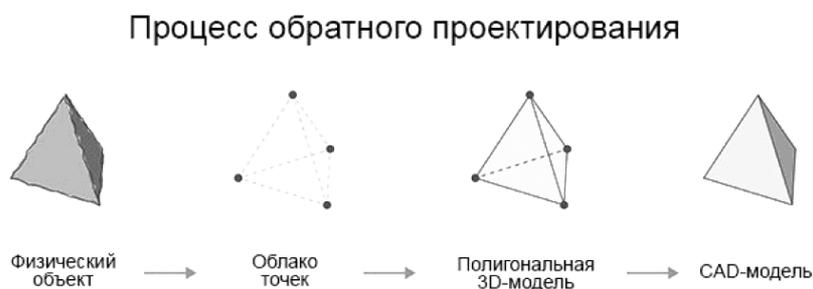


Рисунок 3.10 процесс обратного проектирования

Музейное дело и искусство.

Использование модели Shining 3D Pro 2X Plus способно обеспечить высочайшее

качество оцифровки объекта с максимально точной передачей текстуры. Для тестирования специалистами были выбраны многоцветные полотна и украшенная сложным орнаментом ваза.

Сканер отлично справился с задачей и наглядно доказал тот факт, что его можно смело использовать для каталогизации музейных экспонатов, а также выпуска сувениров (Рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 Использование 3D сканера в музейном деле

Наука.

Эксперты из Суонси смогли адаптировать сканер Artec Eva для слежения за морскими обитателями и изучения их образа жизни в естественной среде. Создав специальные индивидуальные метки, ученые смогли получить полный контроль над поведением подопытных образцов без причинения им физического дискомфорта (Рисунок 3.12).



Рисунок 3.12 Сканер Artec Eva для слежения за морскими обитателями

Образование.

Такие простые и не требующие больших временных затрат для своего освоения модели, как, например, XYZPrinting 3D Hand Scanner 2.0 и 3D Systems Sense 2 станут отличным решением для обучения в школах и техникумах. Возможностей этих устройств с лихвой хватит для ознакомления со спецификой процесса сканирования (Рисунок 3.13).

Более продвинутые модели (например, от компании RangeVision), используются для научно-исследовательской работы во многих ВУЗах. Так, в одном из университетов Вены с помощью 3D-сканера был изготовлен уникальный шаблон, предназначенный для

профессиональной резки свиных мозгов. Специалисты отсканировали материал, а потом придали ему нужную форму с помощью технологии трехмерной печати.



Рисунок 3.13 Обучение детей 3Dтехнологиям

Медицина.

С помощью модели Medit i500 стоматологи могут быстро выполнять безболезненное сканирование зубного рядов пациентов, нуждающихся в срочной медицинской помощи. Имея в наличии точную цифровую копию зубов медики способны пошагово отслеживать ход лечения и обсуждать его эффективность с другими специалистами.

3D-сканирование также может применяться для эффективного создания протезов – такое решение позволяет получить существенную временную и финансовую экономию, по сравнению с затратной процедурой создания слепков.

Подводя итог вышенаписанному, можно сделать вывод, что оптические 3D-сканеры имеют огромное количество применений. Современный рынок таких устройств представлен моделями самой различной стоимости – от 30 000 до 1 500 000 рублей.

Сканеры ручного и стационарного типа могут использоваться практически повсеместно – в образовании, изобразительном искусстве, архитектуре, медицине и т.п. Профессиональные модели 3D-сканеров отлично зарекомендовали себя на производстве, в реверс-инжиниринге и криминалистике. Кроме того, с помощью такой техники можно создавать бюджетную, но качественную сувенирную продукцию.

3.4 Фотограмметрия

Термин «фотограмметрия» происходит от трех греческих слов: photos – свет, грамма – запись, metrio – измерение. Дословно – измерение светозаписи [4, 6, 11-14].

Фотограмметрия — это научно-техническая дисциплина, занимающаяся определением характеристик объектов, таких как форма, размеры, положение в пространстве и других свойств объектов, по фотографическим изображениям.

Дисциплина использует все существующие виды изображений, полученные с помощью фотокамер, цифровых камер, телевизионных камер, сканерных съемочных систем, радиолокационных и лазерных съемочных систем и т.д. и развивается по трем основным направлениям.

Первое направление связано с созданием карт и планов по снимкам. Это направление часто называют фототопографией.

Второе направление связано с применением фотограмметрии для решения прикладных задач в различных областях науки и техники: в архитектуре, строительстве, медицине, криминалистике, автомобилестроении, робототехнике, военном деле, геологии и т.д. Это

направление в фотограмметрии называют наземной или прикладной фотограмметрией.

Третье направление – это космическая фотограмметрия. Снимки Земли, полученные из космоса, используются для изучения ее природных ресурсов и для контроля за охраной окружающей среды. Снимки других небесных тел, в частности Луны, Венеры, Марса, позволяют изучить их рельеф и получить много другой полезной информации.

Такое широкое применение фотограмметрии обусловлено следующими ее достоинствами:

- Высокая точность, потому что снимки объектов получают прецизионными (с соблюдением высокой точности параметров) камерами, а обработку снимков выполняют строгими методами.
- Высокая производительность, достигаемая благодаря тому, что измеряют не сами объекты, а их изображения. Это позволяет автоматизировать процессы измерений по снимкам и последующую обработку на компьютере.
- Объективность и достоверность информации, за счет того, что информация об объекте получается фотографическим путем.
- Возможность повторения измерений в случае получения спорных результатов.
- Возможность получения в короткий срок информации о состоянии, как всего объекта, так и отдельных его частей.
- Безопасность выполнения работ, так как измерения выполняются неконтактным методом. Это имеет особое значение, когда объект недоступен или пребывание в его зоне опасно для здоровья человека.
- Возможность изучения неподвижных, а также медленно и быстро движущихся объектов, скоротечных и медленно протекающих процессов.

Фотограмметрия как наука появилась в середине 19 столетия, через 13 лет после появления фотографии. Однако использование перспективных изображений при составлении топографических карт осуществлено значительно раньше. Теоретическое обоснование возможности определения формы, размеров и положения объекта в пространстве по его перспективному изображению было дано в 1759 году И. О. Ламбертом в работе «Свободная перспектива». В 1764 году великий русский ученый М. В. Ломоносов в инструкции для географических исследований России предложил составлять перспективные рисунки местности с помощью камеры-обскуры (пинхол, стеноп, лохкамера). В 1839 году французский ученый Ж. М. Дагер применил для фиксации изображения, получаемого с помощью такой камеры, светочувствительное серебро, которое наносилось на металлическую пластинку. На этой пластинке получалось позитивное фотографическое изображение. *Так появилась фотография.*

Применять фотографии для создания топографических карт впервые предложил французский геодезист Доминик Ф. Араго примерно в 1840 г., а в 1860 г. французский военный инженер Э. Лосседа выполнил фотографирование Парижа с воздушного шара и по фотоснимкам создал план, точность которого оказалась выше плана, полученного геодезическим методом. Этой работой было положено начало фотограмметрического метода съемки, который в последующие годы совершенствовался и стал применяться во многих странах.

В России первые фототопографические съемки были выполнены в 1891-1898 гг. инженерами Н.О. Виллером, Р.Ю. Тиле, П.И. Щуровым для целей трассирования железных дорог в Закавказье и Восточной Сибири.

Эта технология 3D-сканирования предшествует эпохе компьютеров: после изобретения фотографии ученые быстро поняли, что могут применять принцип естественного стереозрения в своих областях. Используя изображения, снятые с двух немного разных позиций, они смогли измерить и определить местоположение точек объектов в трехмерном пространстве, эксперты называют этот процесс «триангуляцией».

По сей день фотограмметрия используется геодезистами для составления карт с высокой точностью, это оказалось особенно полезным в горных районах, которые труднодоступны или для 3D-сканирования другими технологиями.

Современные компьютерные программы триангулируют целые здания или объекты размером с обувь. В настоящее время даже телефоны можно превратить в портативные 3D-сканеры, просто установив соответствующее приложение. Точность во многом обусловлена качеством изображений. Чем лучше камера с помощью которой вы передаете данные и больше снимков с разных ракурсов, тем лучше будет ваша 3D модель.

Для создания полной 3D модели необходимо сделать много кадров, перемещаясь вокруг объектов с шагом 15–30 градусов, повторяйте это на разных высотах, особенно при 3D сканировании сложных объектов, то есть имеющих много коллизий (Рисунок 3.14). Имейте в виду, что для триангуляции точки ее необходимо сфотографировать как минимум дважды, иначе у вашей сетки будут провалы.

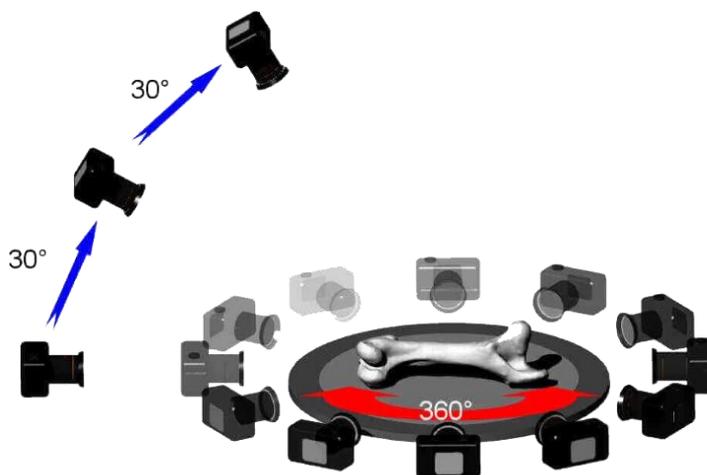


Рисунок 3.14 Принцип фотограмметрии

В истории развития фотограмметрии можно выделить три основных периода, которые можно условно назвать как аналоговая, аналитическая и цифровая фотограмметрия.

Аналоговая фотограмметрия берет свое начало с изобретения в 1901 г. К. Пульфрихом стереокомпаратора (Рисунок 3.15). Этот прибор позволяет измерять координаты точек снимков составляющих стереопару.

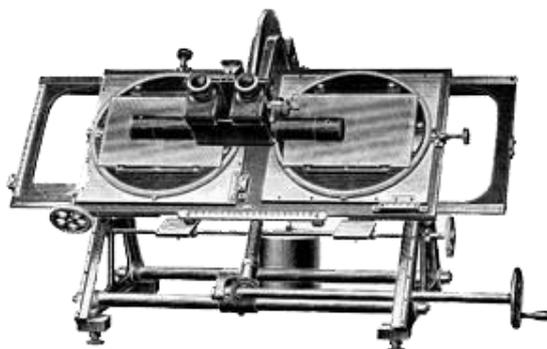


Рисунок 3.15 Стереокомпаратор К. Пульфриха

Далее развитие фотограмметрии пошло по пути создания специальных оптических и механических приборов, предназначенных для непосредственного создания карт по аэро и наземным снимкам. Эти приборы позволяют выполнить все процессы преобразования снимков в карту. Первый такой прибор, стереоавтограф, был разработан в 1909 г. (Е. Орель)

для создания карт по наземным снимкам. В 1915 г Газзер запатентовал стереопроектор, который стал прототипом мультиплекса, позволяющего построить стереоскопическую модель на экране по множеству снимков и измерять ее с целью создания карты. В 1932 г. Ф.В.Дробышев изобрел стереометр, позволяющий нарисовать рельеф местности непосредственно на снимках. Контурную часть карты получали по фотопланам, составленных по множеству трансформированных снимков.

Трансформирование снимков выполняли на специальных приборах, называемых фототрансформаторами (Рисунок 3.16), которые позволяют преобразовать наклонный снимок в горизонтальный. В этот период было разработано достаточно много различных универсальных фотограмметрических приборов, как в России, так и за рубежом, которые используются в некоторых предприятиях и в настоящее время.

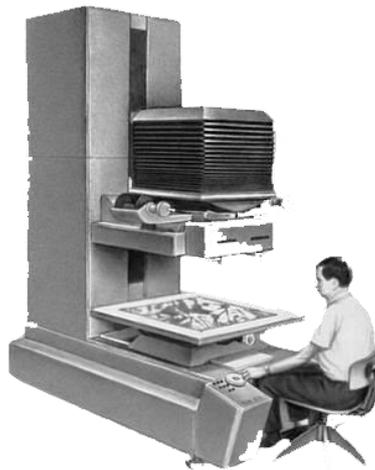


Рисунок 3.16 Фототрансформатор

Аналитическая фотограмметрия. Этот этап в развитии фотограмметрии начинается с появлением ЭВМ (примерно в 1950г.). Начиная с этого времени стали развиваться аналитические методы фотограмметрической обработки снимков, которые продолжают совершенствоваться и по настоящее время. В 1957 г. У.В. Хелава (Канада) разработал первый аналитический универсальный прибор, представляющий собой сочетание стереокомпаратора и электронной вычислительной машины. На стереокомпараторе выполнялись измерения координат точек снимков, а на ЭВМ – все преобразования этих измерений в проекцию карты. По сравнению с аналоговыми приборами аналитические позволяют значительно повысить точность обработки снимков и производительность. Таких приборов и систем было разработано достаточно много (Швейцария, Германия, Франция, Италия, Россия и Украина). В настоящее время они не выпускаются, но используются на производстве.

Цифровая фотограмметрия начала развиваться с появлением цифровых изображений. В начале 90-х годов прошлого столетия появились первые коммерческие цифровые фотограмметрические системы, позволяющие решать все фотограмметрические задачи на компьютере, включая стереоскопическое наблюдение и измерение снимков на экране компьютера. Отличительной особенностью цифровых фотограмметрических систем является возможность широкой автоматизации всех процессов преобразования снимков в карту. Это направление в развитии фотограмметрии в настоящее время является основным и уже широко применяется на производстве.

Современная технология обработки материалов аэрофототопографической съемки предполагает получение цифровых топографических или специальных карт (планов) соответствующего содержания:

Цифровая карта – это карта (план) в цифровой форме, обеспечивающей возможность ее хранения, манипулирования и отображения. При этом математическая основа цифровой

карты, проекция, разграфка, точность и др. остаются такими же, как и для соответствующей ей аналоговой карты.

Цифровая модель местности (ЦММ) – совокупность информации о положении, характеристиках объектов местности, связях между ними, а также топографической поверхности, представленные в форме, доступной для обработки на программном обеспечении (Рисунок 3.17).

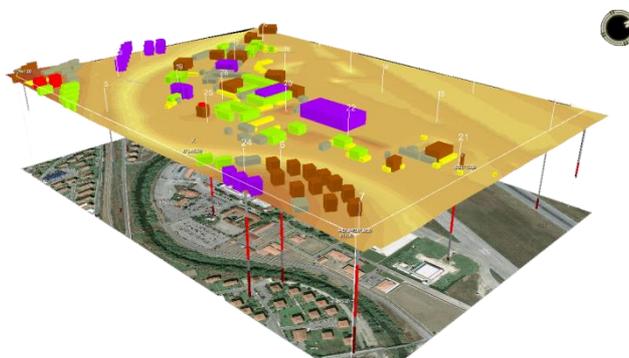


Рисунок 3.17 Цифровая модель местности (ЦММ)

Основой для получения цифровой карты является цифровая модель местности (ЦММ), в составе которой можно выделить и цифровую модель рельефа (ЦМР).

Цифровая модель рельефа (ЦМР) – информация о рельефе местности, представленная совокупностью точек с известными координатами и высотами, связями между ними и способа определения высот новых точек по их известным плановым координатам (Рисунок 3.18).

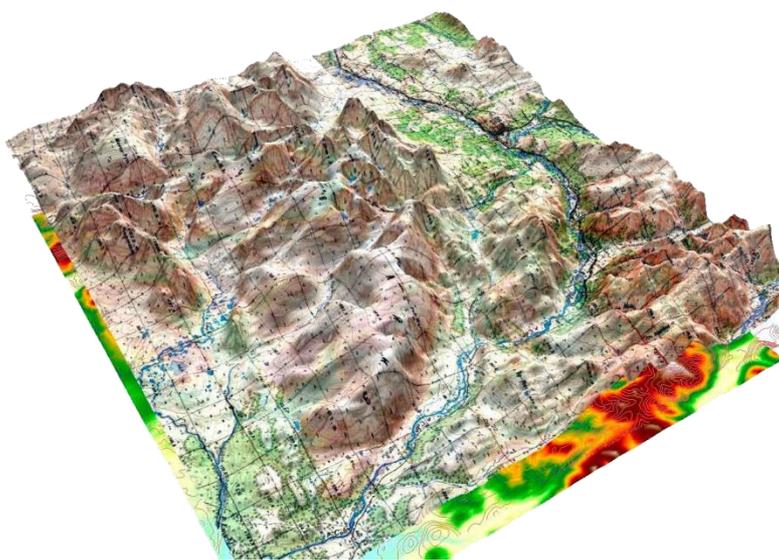


Рисунок 3.18 Цифровая модель рельефа (ЦМР)

Для решения задач цифровой фотограмметрии на современном этапе развития применяются полнофункциональные цифровые фотограмметрические системы, ориентированные на решение всего комплекса задач по созданию топографических и специальных карт и планов, эксплуатируются во многих специализированных топографо-геодезических и изыскательских организациях и не только.

Огромным плюсом сегодняшнего времени стало появление трёхмерных технологий, позволяющие получать модели цифровых карт, ЦММ и ЦМР в режиме 3D, что значительно усовершенствовало такую дисциплину как фотограмметрия.

На сегодняшний день можно смело сказать, что фотограмметрия переживает взрывной

рост в архитектуре и строительстве, социально-культурной сфере, киноиндустрии и анимации в компьютерных играх.

Для примера возьмем мониторинг процесса строительства — весьма актуальная проблема. Уже несколько лет 3D модель объекта строительства используют для отображения прогресса стройки. Например, готовая в срок часть объекта на модели отображается зеленым, находящаяся в процессе — желтым, к строительству которой еще не приступили — серым, а просроченная — красным. Однако эти данные могут быть необъективны, так как не показывают непосредственно строительную площадку, а определить общий прогресс по фотографиям, как правило, довольно тяжело.

Фотограмметрия предлагает инновационное решение этой проблемы. Используется БПЛА, который по заданной траектории облетает строительную площадку и производит аэрофотосъемку объекта. Далее массив фотографий выгружается в один из программных комплексов и производится сборка актуальной модели. Установив период облета, будь то неделя или месяц, удастся отследить объективный прогресс строительства, который можно использовать для отчетов начальству. С помощью дополнительного ПО можно даже сравнивать эти две модели и подсвечивать разницу в них.

Большинство архитекторов и проектировщиков сталкиваются с задачей реставрации старых зданий, а иногда и ремонта новых. Задача приобретает масштаб катастрофы в тот момент, когда срочно необходимы чертежи объектов с указанными размерами, а они утеряны или уже потеряли свою актуальность. В помощь архитекторам и другим специалистам, связанным с реконструкцией и реставрацией зданий, приходит именно фотограмметрия. Нужный объект фотографируется, а после по смежным изображениям выявляются одинаковые точки и определяется их положение в координатах базового снимка. Точки складываются воедино на воображаемых каркасах, и получается готовая модель (Рисунок 3.19).

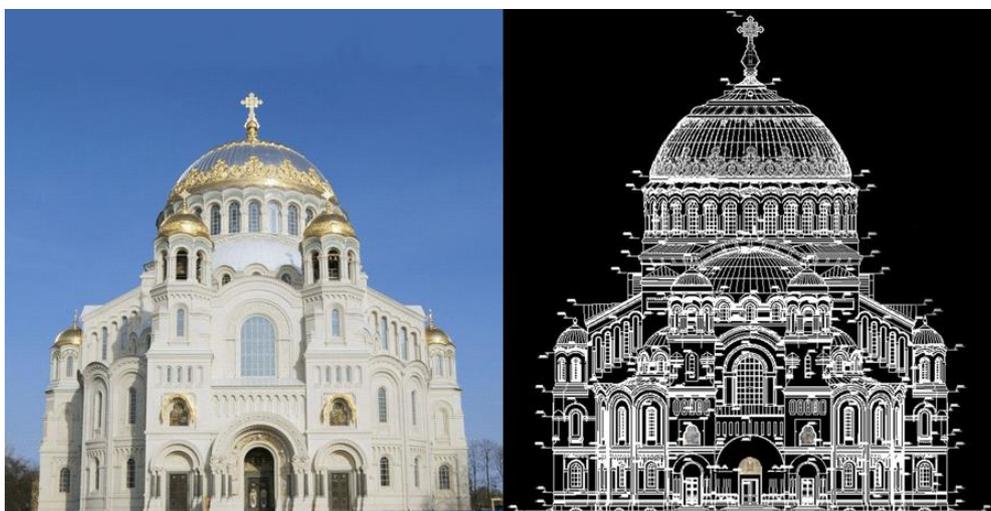


Рисунок 3.19 Фотограмметрия в архитектуре

Социально-культурная сфера — это другая область инновационного применения фотограмметрии. Сейчас в музеях и выставочных центрах во всем мире наиболее популярна технология виртуального тура. Это набор сферических панорам, соединенных между собой ссылками для перехода. У нее определенно есть свои плюсы — это дешево, быстро и просто.

С помощью фотограмметрии можно создать интерактивный трехмерный тур в виртуальной реальности. Фотореалистичность, универсальность, интерактивность — отличие колоссальное. Цифровой камерой делается массив фотографий, например, скульптуры и комнаты, в которой она находится. Далее этот массив загружается в программные продукты, и после доработки специалистами на выходе мы имеем трехмерную

комнату со скульптурой, которую можно буквально обойти вокруг и посмотреть со всех ракурсов.

В последние годы фотограмметрия нашла свое место в современной киноиндустрии, объемное изображение фильмов по так называемой 3D технологии получило особую популярность у молодежи. Главный метод мультипликации с ее самого начала развития всегда завораживал своими конечными результатами в виде популярных мультипликационных фильмов. А всем известный фильм «Аватар» Дж. Кэмерона был частично совмещен с анимацией и технологиями фотограмметрии для воссоздания эффектной планеты «Пандора».

Особо следует отметить применения технологического процесса фотограмметрии в разработке современных компьютерных игр. Он заключается в пошаговом качественном фотосканировании и получении при помощи специальных программ объемной геометрии от многочисленных фотоизображений различных ракурсов. К примеру, с помощью такой технологии были созданы игры «Star Wars: Battlefront» и «Cyberpunk 2077»

Примечательно, что теперь с помощью фотограмметрии и специального ПО любой желающий может с легкостью создать любую 3D модель существующего объекта с помощью камеры и сделанных на неё фотоснимках.

3.5 Промышленная компьютерная томография

Промышленная компьютерная томография (КТ) используется для получения трехмерных изображений твердых объектов при неразрушающем контроле критических деталей и сложных объектов [8, 9, 11]. К общим приложениям относятся:

- Анализ пустот в пластмассовых или металлических деталях.
- Дефектоскопия.
- Анализ неисправностей.
- Метрология.
- Анализ сборки.
- Проектирование с помощью компьютера для частичного сравнения или обратного инжиниринга.
- Здравоохранение.

Исследуемый объект помещается на вращающийся стол между источником рентгеновского излучения и детектором (приёмником). Микрофокусный источник генерирует излучение и посылает рентгеновские лучи через данный образец. Цифровой плоскопанельный детектор фиксирует проекцию исследуемого образца, сформированную рентгеновскими лучами, прошедшими через него. Различные оттенки серого на полученном снимке зависят от плотности материала и его геометрии. Более толстые и плотные вещества, такие как железо, медь, свинец получают темнее, чем более тонкие и лёгкие материалы – пластик, бумага, воздух.

Для создания 3D-модели необходим ряд последовательных снимков, выполненных при вращении объекта на 360 градусов. Затем изображения проходят через специальный алгоритм (реконструкцию) программного обеспечения, которое создаёт трёхмерную модель образца. Помимо наружной поверхности образца, модель отображает и внутренние элементы исследуемого объекта в соответствии с их плотностью. Возможность «перемещения» сквозь 3D-модель позволяет проводить анализ, внутренние измерения, выявлять дефекты и структурные несовершенства материалов (Рисунок 3.20).

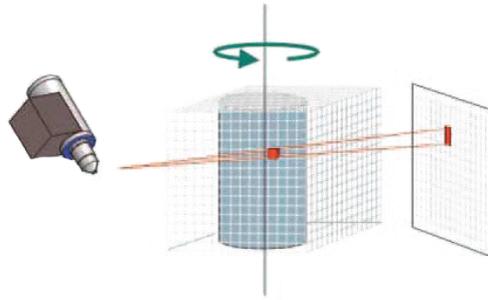


Рисунок 3.20 Технология КТ

3.6 Ультразвуковое сканирование

С конца 30-х годов прошлого века ультразвук стал активно применяться в промышленности [8, 9, 11]. Ранние работы западных ученых-физиков демонстрировали отражение высокочастотных звуковых волн от внутренних дефектов и границ разделов материалов, эхо-сигналы которых отчетливо отображались на экране осциллоскопа.

С 40-х годов началось активное использование ультразвука в медицине (Рисунок 3.21). И в течение 20 лет произошло быстрое развитие от двумерного изображения тканей до диагностирования опухолей, камней в почках и других патологий. Параллельно, достижения в физике ультразвуковых волн способствовали развитию оборонной мощи стран, участвующих во Второй Мировой войне.



Рисунок 3.21 Ультразвуковое исследование

В 1945 г. американский исследователь Флорид Файрстоун запатентовал прибор, который он назвал ультразвуковым рефлектоскопом. Данный прибор считается первым серийным дефектоскопом на основе широко используемого сегодня метода импульс-эхо.

Заметный скачок в развитии ультразвукового контроля приходится на начало 80-х годов. Это связано с появлением доступных микропроцессоров и развитием цифровой обработки сигналов и данных. Применение же фазированных решеток началось с медицины в 60-70 годах для получения поперечных сечений тканей организма человека. Связано это с тем, что науке было уже достаточно многое известно о структуре и физиологии человеческого тела, и интерпретировать данные в медицине было не так сложно, как, например, в промышленных сферах. Но вскоре с развитием компьютерных технологий произошел прорыв в изучении и усовершенствовании приборов фазированных решеток. В 90-х годах появились серийные дефектоскопы малых габаритов и с автономным питанием. Портативные приборы позволили использовать ФР в самых разных отраслях современной

промышленности. Стали доступными электронные настройки параметров, быстрый сбор данных, их обработка и интерпретация.

Сущность метода. Слово «фазированный» обозначает последовательное возбуждение множества элементов, из которых состоит преобразователь (матричная решетка). Обычно количество отдельных элементов варьируется от 16 до 256, каждый из которых возбуждается отдельно по запрограммированной схеме (Рисунок 3.22). Основным принципом фазированного ультразвукового контроля является возбуждение зондирующих импульсов с индивидуальным компьютерным управлением амплитудой сигнала и задержкой по времени для каждого элемента в многоэлементном пьезоэлектрическом преобразователе. Возбуждение сразу нескольких элементов фазированного преобразователя позволяет генерировать сфокусированный ультразвуковой луч с возможностью динамически изменять параметры УЗ луча, такие как угол ввода, фокусное расстояние и размер фокусного пятна с помощью программного обеспечения. Для генерации УЗ волны в одной фазе посредством конструируемой интерференции, различные активные элементы фазированного преобразователя пульсируют в различное заданное время.

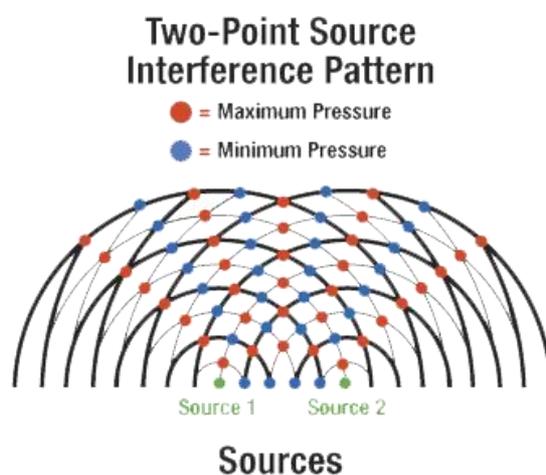


Рисунок 3.22 Сущность метода

Принцип усиливающего и гасящего взаимодействия волн был продемонстрирован английским ученым Томасом Юнгом в 1801 году. В этом знаменитом опыте использовались 2 источника света для создания интерференционных полос. Волны в фазе усиливают друг друга, волны в противофазе гасят друг друга.

Всякий раз, когда волны от двух или более источников взаимодействуют друг с другом, возникают фазовые эффекты, которые приводят к усилению или ослаблению энергии волн в точке их схождения. Если при схождении акустических волн с одинаковой частотой их колебания точно синхронизированы (в фазе или под углом сдвига фазы 0 градусов), энергии волн усиливают друг друга и создают волну большей амплитуды. Если же при схождении волн их колебания не в фазе (на 180 градусов), то энергии волн нейтрализуют друг друга. Если угол фазы составляет более 0 градусов, но менее 180 градусов, при схождении волн их колебания проходят через серию промежуточных стадий, прежде чем усилить или полностью погасить друг друга. Управляя временем запуска генераторов возбуждения, эти эффекты можно использовать для управления лучом и для фокусировки фронта суммарной волны. Это один из основных принципов контроля фазированными решетками.

Элементы обычно возбуждаются группами от 4 до 32 в зависимости от требуемой полезной чувствительности. Чем больше апертура, тем больше чувствительность, тем ниже показатели нежелательного рассеяния луча и резче фокусировка.

Эхо-сигналы принимаются элементами или группами элементов, сдвигаются по времени в зависимости от их задержки в призме и суммируются. Традиционный

одноэлементный преобразователь фактически поглощает эффекты всех компонентов принимаемого луча. В отличие от него, ФР-преобразователь может сортировать в пространстве возвращающийся фронт волны в соответствии с временем прихода и амплитудой сигнала для каждого элемента. При обработке программным обеспечением прибора каждый возвращающийся закон фокусировки представляет отражение от отдельного углового компонента луча, определенной точки на прямолинейной траектории и/или отражение от определенной глубины фокусировки. После обработки эхо-сигнал может быть отображен в любом из стандартных форматов.

Главные преимущества метода. Ультразвуковые системы с фазированными решетками могут использоваться почти в любом виде контроля, где задействованы традиционные ультразвуковые дефектоскопы. Данная технология чаще всего применяется для контроля качества сварных швов и выявления трещин, в самых разных отраслях промышленности: аэрокосмической, энергетической, нефтехимической, в производстве непрерывнолитых металлических заготовок и трубной арматуры, в строительстве и обслуживании нефтепроводов и металлических конструкций. Фазированные решетки также используются для получения профиля остаточной толщины стенок при контроле коррозии.

Главное преимущество технологии фазированных решеток перед традиционным УЗК заключается в том, что управление лучом и его фокусировка осуществляется с помощью одного преобразователя с множеством элементов. Управление лучом, или секторное сканирование, используется для картографирования объектов под определенными углами. Это значительно упрощает контроль объектов со сложной геометрией. Маленькая контактная поверхность преобразователя и возможность сканирования без передвижения ПЭП упрощает контроль труднодоступных объектов. Для контроля качества сварных швов обычно применяется секторное сканирование. Возможность сканирования под разными углами без передвижения ПЭП повышает вероятность обнаружения аномалий в сварных швах. Электронное фокусирование позволяет оптимизировать форму и размер луча в конкретной точке. Способность фокусировки на разных глубинах увеличивает точность измерения критических дефектов для объемного контроля. Фокусировка значительно улучшает отношение сигнал-шум в сложных ситуациях. С-сканы отображаются намного быстрее благодаря электронному сканированию группами элементов.

Потенциальными недостатками фазированных решеток являются относительно высокая стоимость и необходимость проведения контроля квалифицированным оператором. Однако, эти затраты нейтрализуются большой гибкостью оборудования и значительной экономией времени контроля.

Типы сканирования.

Электронное линейное сканирование

С помощью электронного сканирования, один закон фокусировки мультиплексируется вдоль фазированного ПЭП за счет перемещения активной группы элементов. При этом сканирование происходит с постоянным углом ввода при электронном перемещении УЗ луча вдоль ПЭП. Данный тип сканирования аналогичен классическому УЗ контролю с постоянным углом ввода и механическим перемещением ПЭП вдоль объекта контроля. При использовании наклонной призмы мультиплексирование фокального закона учитывает и компенсирует задержки в призме для каждой активной апертуры элементов.

Секторное сканирование

При секторном сканировании УЗ луч перемещается в заданном диапазоне углов ввода с фокусировкой на определенной глубине. Для генерации УЗ луча используется постоянная группа элементов, при этом возможно изменение глубины фокусировки для каждого угла ввода, а также применение более сложных схем фокусировки. Диапазон качения УЗ луча выбирается оператором с учетом физических ограничений.

Динамическая фокусировка по глубине

Динамическая фокусировка по глубине (Dynamic depth focusing) – программирование

обработки принимаемых эхо-сигналов. При этом закон распределения задержек, усиление и возбуждение для каждого элемента являются функциями времени. Динамическая фокусировка по глубине изменяет фокусировку для охвата всего диапазона толщин на стадии приема. Она значительно увеличивает глубину зоны фокусировки и соотношение сигнал-шум.

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИИ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1. Полигональное моделирование

Полигональное 3D моделирование (Polygonal modeling) является неотъемлемой частью нашей повседневной жизни. С ним современный человек сталкивается практически каждый день, возможно, этого даже не осознавая. Кино, мультипликация, компьютерные игры, виртуальная реальность и т.д. – все это направления, где используется полигональная 3D графика [15, 18-21].

С появлением 3D принтеров полигональные модели стали также использоваться для 3D печати объектов.

В связи с возрастающей популярностью 3D принтеров, и сравнительно более простым 3D моделированием по сравнению с поверхностным/твердотельным, форматы полигональных моделей стали больше применять разработчики CNC программ для станков с числовым программным управлением (ЧПУ). В основном ЧПУ по дереву, пластикам и мягким металлам.

Чтобы иметь правильное представление о 3D моделировании, и корректно поставить задачу дизайнеру, достаточно знать несколько основополагающих принципов.

Сегодня существует два основных направления развития 3D моделирования объектов: полигональное и твердотельное (поверхностное).

Основное направление, где используется полигональное 3D моделирование, - 3D графика. Твердотельное/поверхностное - промышленный дизайн.

В зависимости от того, какое конечное изделие Вы хотите получить, выбирается твердотельное (поверхностное) 3D моделирование, либо полигональное.

Например, если вы ходите напечатать на 3D принтере игрушку или вырезать на фрезерном станке 3D рельеф картины из древесины, то следует выбрать полигональный формат 3D модели. Если же собираетесь выпустить любое промышленное изделие, то Вам придется остановить свой выбор на твердотельном формате.

Различия двух форматов заключаются в принципах формирования 3D объекта. В полигональном 3D моделировании объекты строятся из полигонов, в твердотельном /поверхностном 3D моделировании объекты строятся из геометрических элементов, таких как линии, кривые, сплайны и т.д., а на основании этих элементов строятся различные геометрические фигуры.

Полигон – это единичный элемент поверхности, представленный в виде треугольника, либо четырехугольника, который размещен в трехмерной системе координат. Фактически полигональное моделирование является потомком растрового двухмерного изображения (всем хорошо известного пикселя), но в трехмерной системе координат.

Качество полигональной 3D модели определяет количество полигонов, и сопряжения их ребер друг с другом. Всегда действует правило - чем больше полигонов, тем выше детализация полигональной 3D модели.

В 3D моделировании, при высокой детализации полигональной модели, не имеет большого значения сопряжение ребер, если Вы собираетесь изготовить данное изделие на 3D принтере, либо на фрезерном станке. Как правило, системы CNC на станках, которые воспринимают данный формат, имеют алгоритмы, которые делают несущественными подобные ошибки полигональной 3D модели.

Полигональное 3D моделирование, наверное, самый популярный способ разработки 3D модели. Суть заключается в создании и редактировании сетки из полигонов, которые состоят из вершин и ребер (Рисунок 4.1). Нажимая на левую клавишу мыши мы создаем новую вершину, которая соединяется ребром.

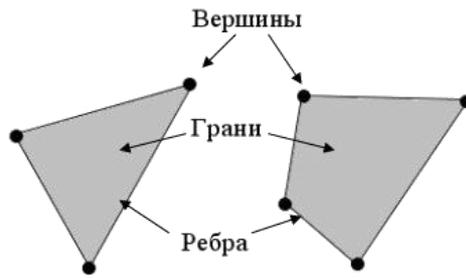


Рисунок 4.1 Принцип полигонального моделирования

Такой процесс моделирования можно представить как форму, например, лица, покрытую прямоугольниками с разной степенью перспективного искажения (Рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 Полигональная модель

Говоря простым языком: «Мы создаем сетку, которая состоит из примитивных фигур (примитивов)». В результате получается многогранник. Чтобы лучше ассоциировать, можно вспомнить как в фильмах и анимации много маленьких роботов превращались в одного большого. Так же и с полигональным моделированием. Много примитивов составляют одну большую модель.

Кстати, чаще всего у полигона четыре грани, но бывает и три. Примитивы с тремя гранями используются только в определенных случаях, а вот больше четырех граней быть не может. Привязки к реальным единицам измерения нет, поэтому модель получается неточной. Соответственно, такой способ не подходит для моделирования каких-то деталей или архитектурных проектов, где важен каждый миллиметр.

Вы просто передвигаете вершину, ребро или весь полигон, ориентируясь на внешний вид. Полигональное моделирование хорошо подойдет, если вы моделируете художественную вещь, и вам не важны точные размеры. Это может быть персонаж, локация уровня игры или животное.

В подавляющем числе случаев виртуальная среда и персонажи в играх, анимационных роликах и кино созданы с использованием полигонального моделирования.

Для справки: чаще всего в мобильных играх используются модели с небольшим числом полигонов, примерно до 10 тысяч. Высокополигональные модели для AAA проектов могут иметь более миллиона полигонов. Но в большинстве игр для консолей и компьютеров модели содержат среднее количество полигонов.

Полигональное моделирование подразделяется на три типа: низкополигональное, среднеполигональное и высокополигональное.

- низкополигональное моделирование (Low-Poly) предназначено для создания объектов с небольшим числом полигонов, обычно, для экономии ресурсов, когда не требуется высокая детализация, а так же для создания низкополигональных иллюстраций, которые набирают большую популярность в последнее время;
- среднеполигональное моделирование (Mid-Poly) ориентировано, обычно, только на необходимый результат при рендеринге, то есть при моделировании нужной геометрии, например, с применением булевых операций; над полигональной сеткой никакие работы по её оптимизации не производят, или они минимальны;
- высокополигональное моделирование (High-Poly) представляет собой создание объекта с большим числом полигонов, обычно, точной его копии.

Стандартная схема High-Poly моделирования происходит с постепенным наращиванием уровня детализации 3D объекта:

- первый уровень является базовым, и представляет собой общую форму объекта;
- на втором уровне происходит уточнение базовой формы, обычно, путём добавления фасок;
- третий уровень завершающий, то есть на нем производится четкая детализация объекта, обычно, путем применения плагинов сглаживания.

На рисунке 4.3 представлены все вышеперечисленные уровни при High-Poly моделировании на примере теннисного мяча.

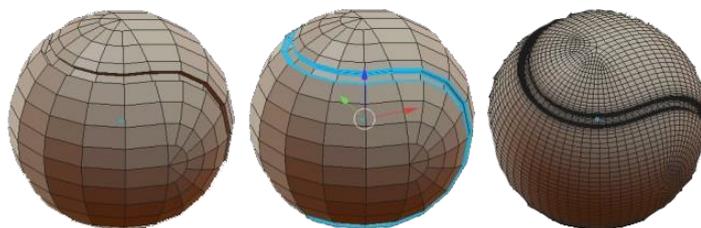


Рисунок 4.3 Три уровня при High-Poly моделировании на примере теннисного мяча

Наиболее популярные 3D-редакторы: 3Ds Max, Maya, Cinema 4D и Blender.

4.2. Сплайновое моделирование

Сплайновое моделирование – это вид 3D моделирования, при котором модель создается при помощи сплайнов (Сплайн – от англ. spline – гибкое лекало, в 3D – это трехмерная кривая). Линии сплайнов задаются трехмерным набором контрольных точек в пространстве, которые и определяют гладкость кривой. Все сплайны сводятся к сплайновому каркасу, на основе которого уже будет создаваться огибающая трехмерная геометрическая поверхность [15, 18-21].

Кроме того, в сплайновом моделировании используются сплайновые примитивы (параметрические объекты, используемые для моделирования объекта). Базовыми сплайновыми примитивами являются (Рисунок 4.4):

1. Линия (Line);
2. Дуга (Arc);
3. Спираль (Helix).

4. Окружность Circle (Circle);
5. Кольцо (Donut);
6. Эллипс (Ellipse);
7. Прямоугольник (Rectangle);
8. Многоугольник (NGon);
9. Многоугольник в виде звезды (Star);
10. Сечение (Section);
11. Сплайновый текст (Text).

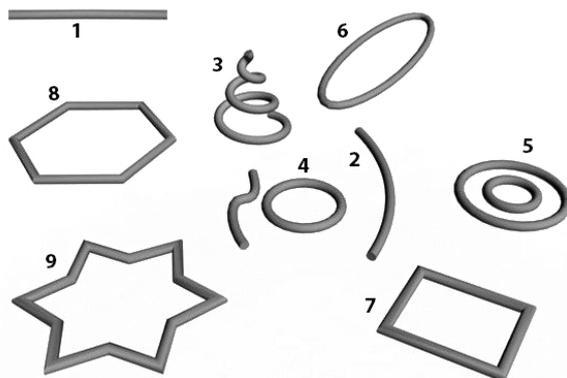


Рисунок 4.4 Базовые сплайновые примитивы

В различных программах, позволяющих работать со сплайнами, есть и другие более сложные сплайновые объекты. Преимущество сплайновых объектов в том, что они обладают гибкими настройками и всегда можно вернуться к изменению их формы.

Сплайновое или полигональное моделирование?

Сплайновое моделирование – более точное, и при масштабировании (приближении) качество объекта не меняется. При сплайновом моделировании форма кувшина описывается множеством кривых по экватору шара. Поверхность, построенную с помощью сплайнов можно масштабировать и изготавливать с такой точностью, которая необходима и которую можно задать на этапе прототипирования.

Формы кувшина, созданные с помощью полигонов, имеют различную степень детализации между плоскостями. Изделие с 260 полигонами имеет степень детализации 35 градусов, с 520 полигонами – 25 градусов, с 1280 полигонами – 10 градусов между гранями (Рисунок 4.5). Несмотря на то, что издали изделие кажется гладким, а количество полигонов более 1000, при изготовлении такого объекта будут небольшие шероховатости, поскольку даже на маленьком объекте заметен угол в 10 градусов между плоскостями.

Полигональное и сплайновое моделирование можно сравнить с помощью растрового и векторного изображений: векторное изображение можно масштабировать в любых пределах и его качество не будет теряться, а при увеличении растрового изображения будет теряться качество линий.

Сплайновые модели, как и векторные изображения, при увеличении масштаба не теряют в качестве. Отсюда ещё один плюс сплайнового моделирования — более высокая точность.



Рисунок 4.5 Сравнение объектов при сплайновом и полигональном моделировании

3D модели, созданные с помощью сплайнового или полигонального моделирования, сохраняются, как правило, в двух форматах: форматы IGES и STL соответственно. Чаще всего на установках прототипирования используются форматы STL, но с помощью специальных программ формат IGES можно перевести в STL. Обратите внимание, что обратное преобразование невозможно.

Используется в CAD-программах, 3Ds Max, Maya.

4.3. NURBS моделирование

NURBS моделирование или технология Non-Uniform Rational B-Spline – это технология неоднородных рациональных B-сплайнов, создание плавных форм и моделей, у которых нет острых краев, как у полигональных моделей. Именно из-за этой отличительной черты технологию NURBS применяют для построения органических моделей и объектов (растений, животных, людей) [15, 18-21].

NURBS-кривые, используемые в данном моделировании, бывают двух видов: P (Point) кривые и CV (Control Vertex) кривые. Point кривые управляются вершинами, находящимися непосредственно на самой линии или объекте, а Control Vertex кривые управляются точками, лежащими за пределами линии или объекта. Разницу наглядно видно на рисунке 4.6.

Разработка NURBS началась в 50-х годах прошлого века инженерами, которые хотели получить математически точное представление произвольных поверхностей (таких, как корпуса кораблей, самолетов, космических аппаратов и автомобилей) с возможностью копирования при необходимости. До появления NURBS инженер рисовал модель от руки на бумаге в единичном экземпляре - эталон.

NURBS не состоят из сетки прямоугольников в отличие от полигонов, разбиение этих поверхностей на многоугольники происходит лишь на этапе рендеринга и предполагает использование оптимального алгоритма для сохранения гладкости. Поэтому при любом приближении соблюдается гладкость поверхности.

Из-за того, что NURBS поверхности всегда гладкие и не имеют острых углов, они широко используются в органическом моделировании для создания моделей животных, людей, машин и других объектов. Поначалу NURBS возможно было использовать только в коммерческих CAD-системах для автомобильных предприятий.

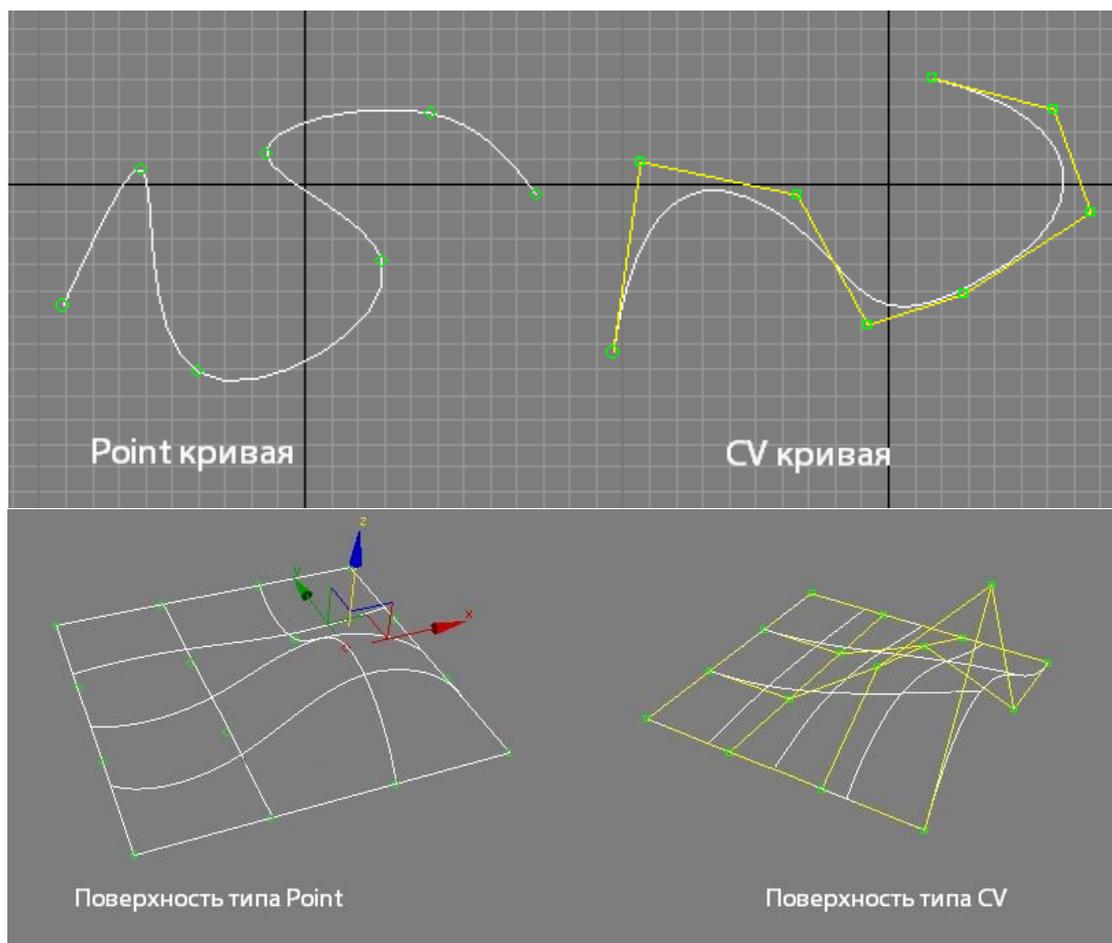


Рисунок 4.6 Разница между P (Point) и CV (Control Vertex) кривыми

Преимущества NURBS при реверс инжиниринге

Методом проектирования NURBS целесообразнее выполнять реверс инжиниринг объектов сложной формы с большим количеством поверхностей, изменяющих свою кривизну по математическим законам. Такой подход обеспечивает большую точность результата и снижает трудоемкость [17].

RangeVision решили узнать, можно ли ускорить процесс NURBS проектирования, используя импорт данных с 3D сканера Spectrum. В качестве органической поверхности инженеры использовали подошву спортивной обуви (Рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 Подошва спортивной обуви

Перед RangeVision стояло несколько задач. Во-первых - произвести высоко детализированную оцифровку геометрии подошвы кроссовка. Во-вторых - на основе данных сканирования построить максимально точную 3D модель с использованием метода NURBS проектирования.

Оцифровка производилась в офисе RangeVision при обычном дневном освещении. Специалисты поместили кроссовок на поворотный стол и настроили 3D сканер Spectrum на вторую зону сканирования, подходящую для оцифровки объектов от 30 см до 1 м (Рисунок 4.8).

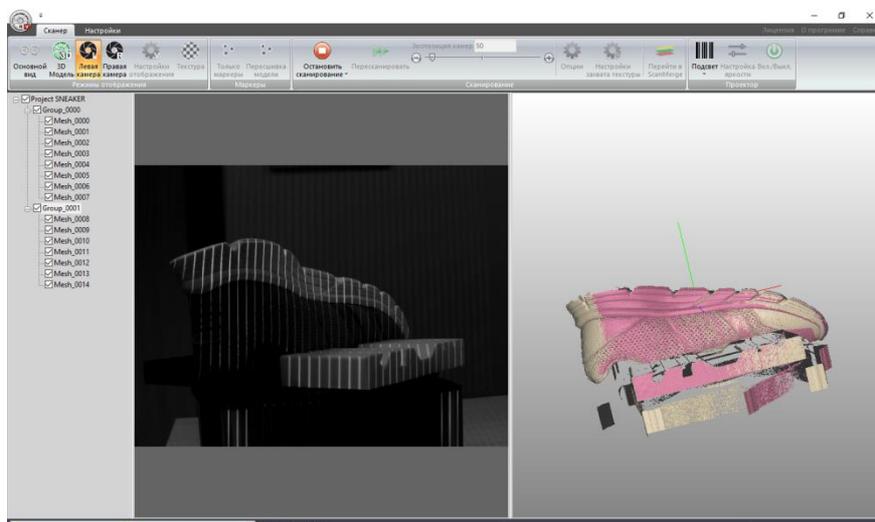


Рисунок 4.8 Скан подошвы

Кроссовок сканировали в двух положениях и получили 16 сканов (2 группы по 8 сканов). Оцифровка объекта заняла 25 минут, еще 35 минут ушло на постобработку и получение финальной 3D модели в формате .stl в программе RangeVision ScanCenter (Рисунок 4.9).

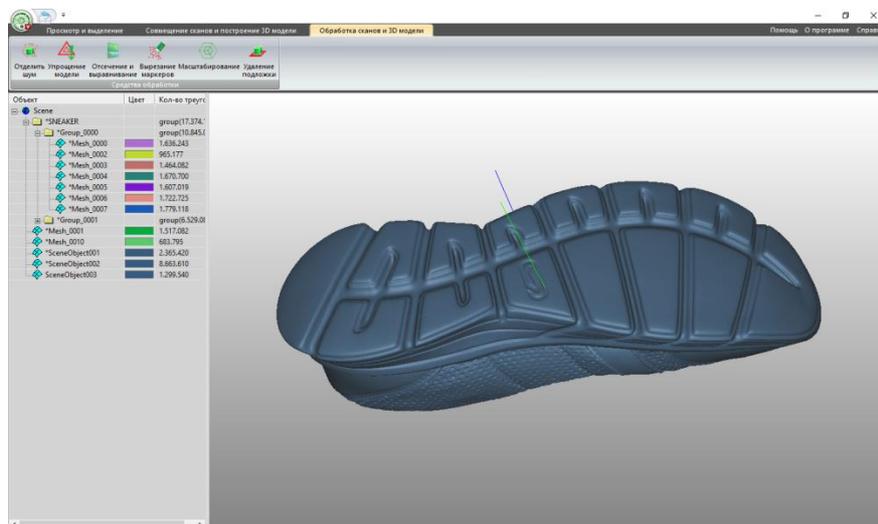


Рисунок 4.9 Финальная 3D модель в формате .stl

После этого приступили к выполнению построения 3D модели подошвы кроссовка с использованием технологии NURBS. В начале файл в формате .stl был импортирован в программу Geomagic Studio, а также была выставлена система координат (Рисунок 4.10).

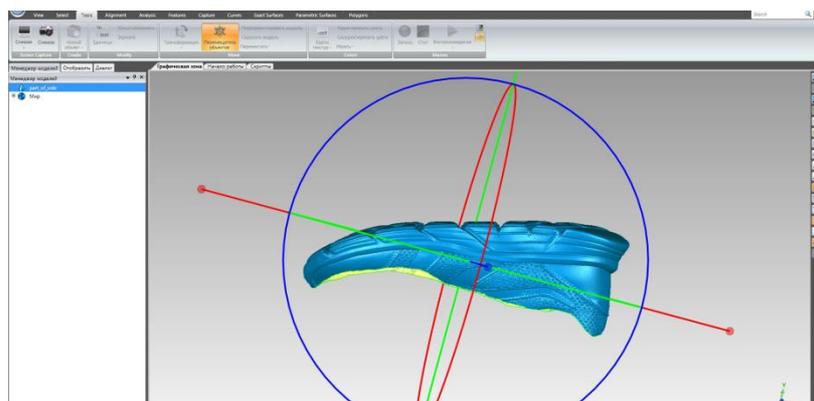


Рисунок 4.10 Выставленная система координат

Далее была отрисована линия обрезки скана и удалена полученную часть (Рисунок 4.11).

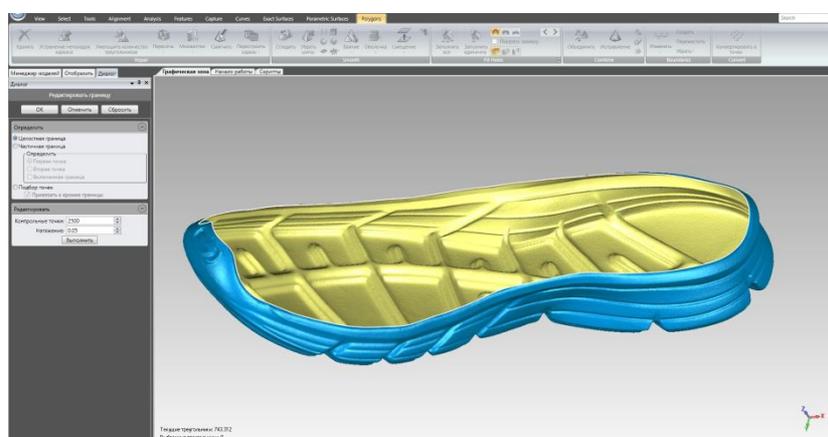


Рисунок 4.11 Отделенная подошва

Во время подготовки к NURBS-проектированию были устранены дефекты поверхности подошвы, которые присутствовали на эталоне, и удален цифровой шум.

Построение и редактирование сетки позволило спроектировать органическую поверхность с использованием технологии NURBS (Рисунок 4.12).

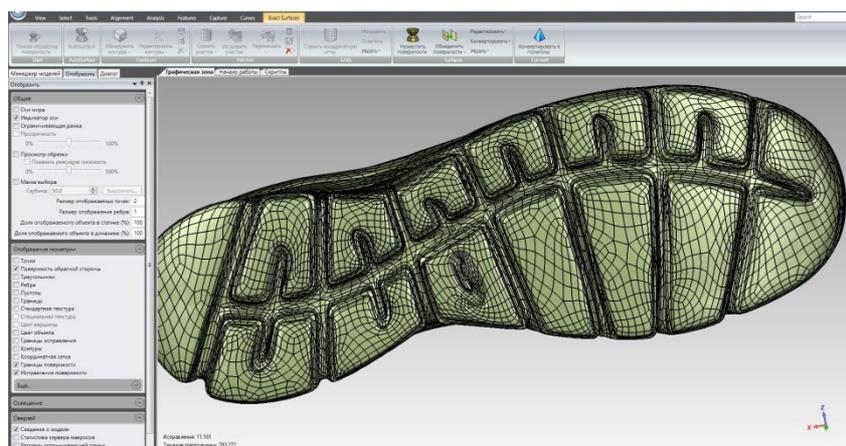


Рисунок 4.12 Органическая поверхность с использованием технологии NURBS

Построенная 3D модель может быть сохранена в формат .igs или .stp и экспортирована в любую другую программу (в зависимости от поставленных перед проектировщиком целей) для выполнения дальнейшей работы. Всего на реверс инжиниринг данного объекта с использованием технологии NURBS ушло 4 часа.

Задача была полностью решена в течение одного рабочего дня. Для сравнения, на построение такой же поверхности “с нуля” без использования 3D сканирования потребовалось бы около 4 рабочих дней. Данные, полученные с 3D сканера Spectrum, обладали высокой детализацией, что позволило выполнить реверс инжиниринг органической поверхности с использованием технологии NURBS в 8 раз быстрее.

В качестве же примеров программ, которые используют моделирование кривыми как основной метод, можно привести «Rhinceros», «Autodesk Alias», «MOI 3D», «SolidThinking».

4.4. Параметрическое моделирование

Параметрическое моделирование (параметризация) — моделирование (проектирование) с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами. Параметризация позволяет за короткое время «проиграть» (с помощью изменения параметров или геометрических соотношений) различные конструктивные схемы и избежать принципиальных ошибок [16, 18-21].

Параметрическое моделирование существенно отличается от обычного двухмерного черчения или трёхмерного моделирования. Конструктор в случае параметрического проектирования создаёт математическую модель объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации детали, взаимные перемещения деталей в сборке и т. п.

Идея параметрического моделирования появилась ещё на ранних этапах развития САПР, но долгое время не могла быть осуществлена по причине недостаточной компьютерной производительности. История параметрического моделирования собственно началась в 1989 году, когда вышли первые САПР с возможностью параметризации. Первопроходцами были Pro/Engineer (трёхмерное твердотельное параметрическое моделирование) фирмы Parametric Technology Corporation и T-FLEX CAD (двухмерное параметрическое моделирование) фирмы Топ Системы

Типы параметризации

Табличная параметризация

Табличная параметризация заключается в создании таблицы параметров типовых деталей. Создание нового экземпляра детали производится путём выбора из таблицы типоразмеров. Возможности табличной параметризации весьма ограничены, поскольку задание произвольных новых значений параметров и геометрических отношений обычно невозможно.

Однако табличная параметризация находит широкое применение во всех параметрических САПР, поскольку позволяет существенно упростить и ускорить создание библиотек стандартных и типовых деталей, а также их применение в процессе конструкторского проектирования.

Иерархическая параметризация

Иерархическая параметризация (параметризация на основе истории построений) заключается в том, что в ходе построения модели вся последовательность построения отображается в отдельном окне в виде «древа построения». В нем перечислены все существующие в модели вспомогательные элементы, эскизы и выполненные операции в порядке их создания.

Помимо «древа построения» модели, система запоминает не только порядок её формирования, но и иерархию её элементов (отношения между элементами). Пример: сборки → под сборки → детали.

Параметризация на основе истории построений присутствует во всех САПР использующих трёхмерное твердотельное параметрическое моделирование. Обычно такой тип параметрического моделирования сочетается с вариационной и/или геометрической параметризацией.

Вариационная (размерная) параметризация

Вариационная или размерная параметризация основана на построении эскизов (с наложением на объекты эскиза различных параметрических связей) и наложении пользователем ограничений в виде системы уравнений, определяющих зависимости между параметрами.

Процесс создания параметрической модели с использованием вариационной параметризации выглядит следующим образом:

- На первом этапе создаётся эскиз (профиль) для трёхмерной операции. На эскиз накладываются необходимые параметрические связи.
- Затем эскиз «образмеривается». Уточняются отдельные размеры профиля. На этом этапе отдельные размеры можно обозначить как переменные (например, присвоить имя «Length») и задать зависимости других размеров от этих переменных в виде формул (например, «Length/2»)
- Затем производится трёхмерная операция (например, выдавливание), значение атрибутов операции тоже служит параметром (например, величина выдавливания).
- В случае необходимости создания сборки, взаимное положение компонентов сборки задаётся путём указания сопряжений между ними (совпадение, параллельность или перпендикулярность граней и рёбер, расположение объектов на расстоянии или под углом друг к другу и т. п.).

Вариационная параметризация позволяет легко изменять форму эскиза или величину параметров операций, что позволяет удобно модифицировать трёхмерную модель.

Геометрическая параметризация

Геометрической параметризацией называется параметрическое моделирование, при котором геометрия каждого параметрического объекта пересчитывается в зависимости от положения родительских объектов, его параметров и переменных.

Параметрическая модель, в случае геометрической параметризации, состоит из элементов построения и элементов изображения. Элементы построения (конструкторские линии) задают параметрические связи. К элементам изображения относятся линии изображения (которыми обводятся конструкторские линии), а также элементы оформления (размеры, надписи, штриховки и т. п.).

Одни элементы построения могут зависеть от других элементов построения. Элементы построения могут содержать и параметры (например, радиус окружности или угол наклона прямой). При изменении одного из элементов модели все зависящие от него элементы перестраиваются в соответствии со своими параметрами и способами их задания.

Процесс создания параметрической модели методом геометрической параметризации выглядит следующим образом:

- На первом этапе конструктор задаёт геометрию профиля конструкторскими линиями, отмечает ключевые точки.
- Затем проставляет размеры между конструкторскими линиями. На этом этапе можно задать зависимость размеров друг от друга.
- Затем обводит конструкторские линии линиями изображения — получается профиль, с которым можно осуществлять различные трёхмерные операции.

Последующие этапы в целом аналогичны процессу моделирования с использованием метода вариационной параметризации.

Геометрическая параметризация даёт возможность более гибкого редактирования модели. В случае необходимости внесения незапланированного изменения в геометрию модели не обязательно удалять исходные линии построения (это может привести к потере ассоциативных взаимосвязей между элементами модели), можно провести новую линию построения и перенести на неё линию изображения.

Примеры САПР, использующих трёхмерное твердотельное параметрическое моделирование:

ADEM CAD/CAM/CAPP — российская САПР среднего класса,

CATIA — САПР тяжёлого класса французской фирмы Dassault Systemes,

NX (Unigraphics) — САПР тяжёлого класса Siemens PLM Software,

Creo Parametric ранее Pro/Engineer — САПР тяжёлого класса Parametric Technology Corporation (PTC),

Inventor — САПР среднего класса от Autodesk,

Solid Edge — САПР среднего класса от Siemens PLM Software,

SolidWorks — САПР среднего класса SolidWorks Corporation (подразделение Dassault Systemes),

3design CAD — САПР для ювелирного и графического дизайна от Vision Numeric,

T-FLEX CAD — российская САПР среднего класса, использующая геометрическую параметризацию, компании Топ Системы,

КОМПАС-3D — известная российская САПР среднего класса компании АСКОН, созданная на основе собственного ядра геометрического моделирования.

4.5. Поверхностное моделирование

Поверхностное моделирование – является одной из самых лучших технологий, применяемых для создания объемных или 3D объектов и форм. Данная технология реализована в программах верхнего уровня [16, 18-21]. Поверхностное моделирование используется специалистами для создания сложных форм; применяется для изображения поверхностей деталей внешнего вида – машины, самолеты, бытовая и промышленная техника. Технология применяется для проектировки объектов, изготавливаемыми штамповочными или литьевыми способами (Рисунок 4.13).



Рисунок 4.13 Поверхностная модель

Преимущества поверхностного моделирования:

1. Достоверное представление любого по сложности объекта;
2. Контроль взаимно расположенных деталей;
3. Подготовка управляющих программ для станков.

При моделировании поверхностей в первую очередь создаются и видоизменяются поверхности всех элементов и деталей моделируемого объекта. Поверхности элементов соединяют между собой путем скругления или перехода, на местах их пересечения лишнее обрезают, и, таким образом, из всех поверхностей собирают внешнюю оболочку моделируемого объекта (Рисунок 4.14).



Рисунок 4.14 Внешняя оболочка моделируемого объекта

Поверхностное моделирование способно проектировать поверхности объекта, внутри же изделие пустое, которое состоит из патчей. Патч и топологические поверхности являются основными понятиями, которые используются при поверхностном моделировании. Поверхность – это и есть геометрическая модель такая же как и тела, и адаптивные формы. Поверхность это собственно граница, которая делит рабочее пространство на два полупространства.

К слову, при поверхностном моделировании совсем необязательно, чтобы оболочка модели была замкнутой. Довольно часто применяют поверхностное моделирование для моделирования сложных элементов, деталей объекта. Моделирование поверхностей широко применяется для проектирования планеров самолетов, кузовов автомобилей и т.п (Рисунок 4.15).

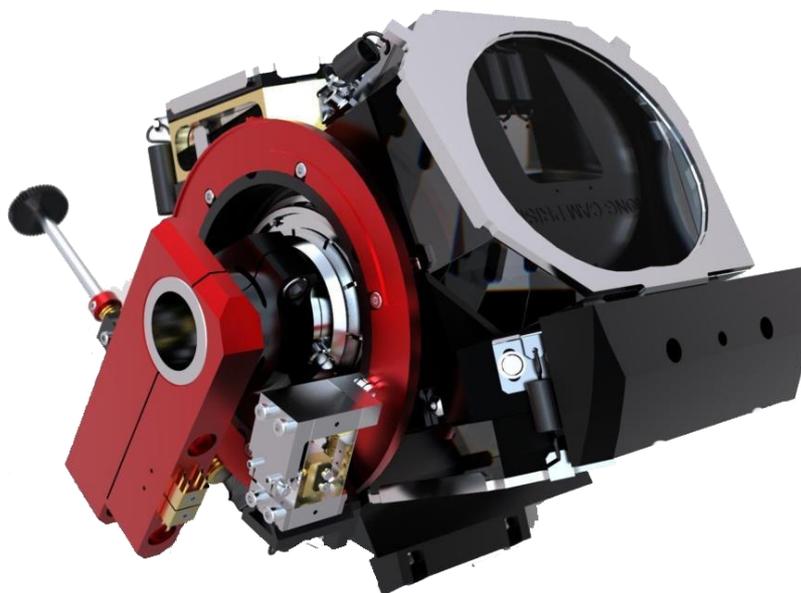


Рисунок 4.15 Поверхностное моделирование сложных элементов

4.6. Твердотельное моделирование

Твердотельное моделирование – это проектирование тел, имеющих все признаки физического тела [16, 18-21]. Объекты, выполненные с помощью данной технологии, лучше воспринимаются по сравнению с объектами, выполненными другими способами (Рисунок 4.16).



Рисунок 4.16 Твердотельная модель

При твердотельном моделировании моделлеры работают не с отдельными поверхностями, а сразу с оболочками. Поверхность моделируемого объекта полностью описывается оболочками, которые отделяют внутренний объем объекта от всего остального пространства. В твердотельном моделировании процесс построения оболочки объекта аналогичен процессу изготовления самого моделируемого объекта. Сначала создается оболочка простой формы, которую потом уже подгоняют под модель нужным образом.

Преимущества твердотельного моделирования:

1. Лучшая визуализация и восприятие созданной модели – трехмерная модель с применением современных технологий выглядит более чем реалистично.
2. Автоматическое формирование чертежей – одно из самых главных преимуществ данной технологии. Построение модели и формирование чертежей по ней с использованием твердотельного моделирования – дело нескольких секунд.
3. Быстрота и легкость в процессе внесения изменений и корректировок в модель – не нужно заново формировать чертеж, достаточно изменить нужные пункты и обновить программу. Также можно использовать шаблоны, что значительно сократит время на выполнение работы.
4. Объединение с различными дополнительными приложениями – интеграция позволяет сократить время, использовав сразу полученные результаты на последующих стадиях работы.
5. Скорость при проектировании – твердотельное моделирование сокращает срок выполнения проектирования объекта. Быстрота моделирования позитивно влияет на скорость возвращения вложенных инвестиций.

Создание твердотельных моделей как никогда сегодня актуально. Важно не только быстро создавать объект, но и так же быстро редактировать его. Твердотельное моделирование обладает данными качествами, поэтому оно считается самой совершенной технологией. Методы представлений, а именно граничный и конструктивный обеспечивают максимально реалистичные модели.

Обладая такими существенными преимуществами, твердотельное моделирование признано самым быстрым, качественным и эффективным методом при проектировании сложных объектов.

Последовательность твердотельного моделирования

В зависимости от сложности моделируемого объекта моделирование может включать в себя построение одного или нескольких тел. Создание одиночного тела начинается с построения одного тела простой формы или построения тела на базе поверхностей, или построения тела на базе линий.

Простые тела: прямоугольная призма, сферическое тело, цилиндрическое тело, коническое тело, тороидальное тело.

Тела на базе линий: тело выдавливания, тело вращения, тело сдвига, тело заметания, тело на основе плоских сечений.

Тело на базе поверхностей: тело в форме листа.

Действия, операции, которые можно проводить над всеми телами:

- булево объединение тел;
- булево пересечение тел;
- булево разность тел;
- резка тела поверхностями;
- построение симметричного тела;
- построение эквидистантного тела;
- построение тонкостенного тела;
- скругление ребер тела;
- фаски ребер тела;
- построение ребер жесткости;
- построение тела с пустотами.

Как уже говорилось, процесс построения оболочки сложного тела аналогичен процессу изготовления самого моделируемого объекта. С помощью операции булева объединения к телу можно добавить требуемый объем (для этого необходимо создать еще одно тело и объединить с исходным телом). Аналогичным образом с помощью операций булева пересечения или вычитания из тела можно убрать ненужный объем (отрезать лишнюю часть объема). С помощью остальных операций можно скруглить ребра тела, снять с них фаски (убрать скругленность), построить тонкостенное тело. Для симметричных тел достаточно будет построить только одну половину тела, а затем применить операцию построения симметричного тела.

При создании нескольких тел можно получить сборку тел. При сборке тел все тела равноправны.

Поверхностное и твердотельное моделирование: общее и отличия.

Поверхностное моделирование (моделирование поверхностей) имеет много общего и много отличий с твердотельным моделированием (моделирование твердых тел). После проведения моделирования в обоих случаях результатом является оболочка, которая описывает поверхность объекта.

При поверхностном моделировании специалист сначала создает поверхность, модифицирует ее. Затем поверхность обрезается по линиям пересечения и соединяется с другими поверхностями. Таким образом, мастер «складывает» нужную оболочку. Такой способ моделирования позволяет создавать сложные формы и объекты.

Работая по твердотельной технологии, специалист сначала работает с оболочкой, а потом с отдельными поверхностями. Принцип работы простой: создание простой оболочки, полностью описываемой объект. Потом с помощью различных операций: булевые, округления, построения ребер и других, оболочке придается нужная форма.

Поверхностное и твердотельное моделирование являются всего лишь разными способами для достижения одного и того же результата. Аналогичные действия, выполненные в разной последовательности, определяют главные отличия между поверхностным и твердотельным моделированием.

4.7. 3D-скульптинг

3D-скульптинг он же «цифровая скульптура» представляет собой имитацию процесса «лепки» 3D модели, то есть деформирование её полигональной сетки специальными инструментами – кистями [18-20]. Можно провести аналогию с лепкой фигур руками из

пластилина или глины. Только в программах 3D моделирования пальцы заменены на инструмент «кисть», а «пластилином» является полигональная сетка (Рисунок 4.17).



Рисунок 4.17 Цифровая скульптура

Программное обеспечение для 3D скульптинга это софт в котором помимо традиционных функций трехмерного моделирования есть инструменты, с помощью которых вы можете обрабатывать и дополнять объекты, как если бы они были реальной моделью из глины. Основные действия, которые вы можете сделать с моделью, — это вдавить, потянуть, сгладить, схватить или сжать, чтобы она приняла окончательный вид. Геометрия поверхности, используемая в различных программах 3D скульптинга для представления модели, может варьироваться: каждая из них предлагает свои преимущества и содержит некоторые ограничения. В одних программах используется геометрия на основе сетки, в других геометрия на основе вокселей или даже сочетание некоторых базовых геометрических представлений. Причина, почему программное обеспечение для 3D-скульптинга так популярно среди графических дизайнеров, геймеров и создателей CG (компьютерная графика), заключается в том, что оно дает вам возможность вставлять детали в сетки, которые иначе было бы сложно или невозможно создать с помощью методов традиционного 3D-моделирования. Используя ПО для скульптинга, вы также можете достичь фотореалистичных и гиперреалистичных результатов, которые могут найти применение даже в кино или анимации.

Программное обеспечение для цифровой скульптуры: какую из них выбрать?

На самом деле существует два типа программного обеспечения, которое вы можете использовать для проекта цифровой скульптуры. Это может быть использование геометрии на основе сетки или геометрии на основе вокселей. Но в чем разница?

– Сетчатая геометрия

Геометрия на основе сетки создает взаимосвязь поверхностной сеткой из полигонов, которую можно перемещать или тянуть. Одним из его преимуществ является то, что сетка может редактироваться с различными уровнями детализации: некоторые детали с мелкими надстройками могут иметь маленькие многоугольники, в то время как другие могут иметь большие многоугольники.

– Воксельная геометрия

Но есть и другой вариант, геометрия на основе вокселей, где объем фактически является базовым элементом, с материалом, который можно добавлять или удалять. Это довольно просто: эта техника дает полную свободу в вашем цифровом скульптурном проекте. Работа с низким уровнем детализации рискованна и может разрушать более мелкие детали.

Сегодня доступно множество программ для цифровой «лепки». Но вам нужно действительно выбрать тот, который идеально подойдет вашему проекту. Некоторые из этих программ используют сложные вычисления для создания многоугольных сеток, которые вы можете лепить, как глина.

Имейте в виду, что 3D-скульптинг не для всех, для создания действительно хороших фотореалистичных моделей может потребоваться определенная подготовка.

В чем разница между 3D-моделированием и цифровым моделированием?

Чтобы не тратить много время на ваш проект, вы должны сначала определить, какой из этих методов 3D вам нужен: цифровое моделирование или 3D-моделирование? Да, эти два подхода, очень похожи, но они не совсем одно и то же. Только характер вашего проекта будет определять, какую из них вы должны использовать.

Создание цифровых моделей — это органичный способ создания 3D-модели, в то время как программное обеспечение для 3D-моделирования использует линии, формы и векторы для создания 3D-модели. С программным обеспечением для скульптинга определенно должно быть художественный талант, поскольку оно действительно позволяет создавать свободные формы с нуля, работать с текстурами, а также добавлять цифровую живопись. Органическое моделирование является более интуитивным, чем традиционное программное обеспечение для 3D-моделирования.

3D-моделирование будет более приспособлено к техническим проектам, требующим действительно точного набора инструментов и размеров. Например, вы никогда не будете использовать программное обеспечение для цифровой скульптуры при создании проекта машиностроения, оно вообще для этого не подходит.

Программами-представителями данного вида моделирования являются «ZBrush», «Sculptris», «Autodesk Mudbox» и др.

4.8. Промышленное моделирование

Системы Автоматизированного Проектирования (САПР) и или по-английски CAD (Computer-Aided Design) применяют для создания 3d моделей в первую очередь промышленного назначения. Они предназначены для создания точных копий реальных объектов [19-21].

При данном виде моделирования учитываются не только малейшие зазоры, но и свойства материала моделируемого объекта. В связи, с чем данный вид моделирования нашел широкое применение в инженерном деле. Особенность этого моделирования в том, что для создания модели не используют полигоны, а цельные формы.

Промышленное моделирование можно разделить на следующие подвиды: параметрическое, твердотельное и поверхностное, которые были рассмотрены ранее.

Параметрическое моделирование

Параметрическое моделирование осуществляется путем введения требуемых параметров элементов модели, а так же соотношение между ними. Иными словами создается математическая модель с нужными параметрами, изменяя которые можно создать различные комбинации модели и тем самым избежать ошибок, внося необходимые корректировки.

Является достаточно старым и самым простым способом проектирования промышленных деталей и механизмов.

Твердотельное моделирование

Если при полигональном моделировании куб разрезать пополам, то там внутри будет пустота. При твердотельном моделировании, если разрезать куб, то там не будет пустоты, как если бы разрезали реальный твердый предмет.

При построении модели работают сразу со всей оболочкой, а не с отдельными поверхностями. Сначала создается простая форма оболочки, например, сферы, а затем к ней применяют различные операции: резка, объединение с другими телами, булевы операции и др.

Твердотельное моделирование идеально подходит для создания твердых 3d моделей несложной формы: шестеренок, двигателей, и т.д., но не применим к созданию мягких: мятой одежды, животных и т.д.

Поверхностное моделирование

Поверхностное моделирование, обычно, используется для создания поверхностей сложных форм: автомобилей, самолетов и т.д.

Модель строится из различных поверхностей, которым придают нужную форму, а затем соединяют между собой, например, плавными переходами, а лишнее обрезают. Таким образом, форма нужной оболочки объекта собирается из нескольких поверхностей.

Примерами программ для промышленного моделирования являются: «Compas-3D», «SolidWorks», «Solid Edge» и т.п.

Моделирование метасферами

Так же следует упомянуть о таком моделировании как «Metaball», то есть моделирование метасферами.

Аналогично сплайновому или NURBS моделированию данный вид позволяет создавать модели сглаженной формы. Его особенность в том, что модель строится из 3D объектов сглаженной замкнутой формы (метасфер), которые при соприкосновении друг с другом автоматически сливаются частями соприкасающихся поверхностей. Метасферы как бы притягиваются друг к другу подобно каплям воды или ртути.

При помощи «Metaball» легко создавать, например, капли росы на листьях деревьев, различные кочки или прыщи на коже персонажа.

Примером программы, в которой возможно моделирование метасферами является Blender.

ГЛАВА 5. ВЫБОР 3D ТЕХНОЛОГИИ

5.1 Выбор материала и технологии 3D печати

5.1.1. Пластик

Под пластиком в 3D-печати понимают широкий спектр полимерных материалов.

Главные характеристики: прочность и износостойкость [22-25].

Что печатают:

- прототипы для функционального тестирования;
- прототипы для визуальной оценки (концептуальное моделирование);
- образцы для проверки собираемости;
- корпуса для приборов, части сборных конструкций;
- детали для ремонта;
- готовые к эксплуатации изделия.

«Пластик» — общее название нескольких типов термопластиков, нейлонов, полиамидов и схожих материалов, используемых в 3D-принтерах. Различные виды пластиков используются более чем в 80% систем 3D-печати.

Отличие пластика от других материалов для 3D-печати:

- Высокая прочность
- Гибкость
- Износостойкость
- Доступность
- Широкие возможности пост-обработки (шлифовка, окраска, сверление и пр.)
- Повышенная термостойкость (для отдельных материалов)

ABS и PLA — особенности и применение

Самые распространенные типы пластиков. Используются как в персональных так и в профессиональных 3D-принтерах.

ABS — популярный и дешевый тип материала, подходящий для решения большого круга задач в области концептуального моделирования, образования и мелкосерийного производства. Массово используется в пользовательских 3D-принтерах и полупрофессиональных системах. Доступен в широкой цветовой палитре.

PLA — биоразлагаемый материал, легко утилизируется. Уступает в прочности и гибкости ABS, но выигрывает в цене. Доступно большое количество цветов, в том числе — полупрозрачный.

Типы пластика для профессиональной 3D-печати по технологии FDM

В профессиональных и промышленных 3D-принтерах используются типы пластиков с более устойчивыми и надежными физическими характеристиками.

В профессиональной 3D-печати наиболее популярны разновидности ABS-пластика инженерного уровня. Профессиональный ABS (например, ABSPlus-430) имеет статус production grade и может использоваться для серийного производства изделий (Рисунок 5.1). Также он значительно прочнее обычного и может обладать некоторыми свойствами (прозрачность, цветность, антистатичность, биосовместимость и прочее).

Другую группу составляют не-ABS материалы. Каждый из них обеспечивает производство изделий с нужными свойствами:

- повышенная прочность;
- повышенная гибкость;
- высокое качество поверхности;
- термостойкость;
- устойчивость к ультрафиолетовому излучению;

– устойчивость к химикатам и др.

Поэтому выбор материала (а следовательно — и 3D-принтера) зависит от того, какой диапазон задач вы планируете решать с помощью 3D-печати.



Прототип корпуса из материала ASA



Пример изделия из материала ABS-M30

Рисунок 5.1 Профессиональные пластики

Пластик для порошковой 3D-печати

Отдельно стоит сказать про типы пластика, используемого для 3D-печати с помощью порошковых технологий: SLS и CJP.

В SLS-печати используются различные типы полиамидных порошков, которые обеспечивают прекрасное качество и стабильные физические характеристики готовых изделий. Частицы материала, спекаемые лазером, приобретают свойства, превосходящие те, что получают изделия, изготовленные по технологии FDM (Рисунок 5.2).



Прототип, созданный на SLS-принтере ONSINT



Примеры изделий, созданных по технологии SLS

Рисунок 5.2 Прототипы, созданные по технологии SLS

Пластик, используемый для печати по технологии CJP, порошковый. В процессе построения изделия он окрашивается и склеивается послойно специальным веществом. Главное преимущество таких изделий — прочность и отсутствие обязательной пост-обработки (в отличие от гипсовых 3D-принтеров). Единственный 3D-принтер, способный производить полноцветные изделия из пластика, — ProJet 4500.



Рисунок 5.3 3D-принтеры, печатающие различными видами пластика

5.1.2. Фотополимерные материалы

Фотополимерные материалы используются в 3D-принтерах, работающих по технологиям MJM, SLA и PolyJet. В эту группу объединены вещества, которые послойно отверждаются под действием ультрафиолетового излучения или лазера.

Фотополимерные материалы в процессе 3D-печати отверждаются под действием УФ-излучения или лазера. Существует большой выбор подобных материалов с различными физическими свойствами.

Главные характеристики: высокая точность и качество поверхности.

Что печатают (Рисунок 5.4):

- прототипы для визуальной оценки;
- выжигаемые мастер-модели для высокоточного литья;
- мастер-модели для литья в силикон;
- пресс-формы для мелкосерийного литья под давлением;
- детали для ремонта;
- готовые к эксплуатации изделия.

Основные характеристики фотополимерных материалов:

- Высокая точность и детализация
- Гладкие поверхности готовых изделий
- Наличие выжигаемых материалов
- Относительная хрупкость (за исключением нескольких материалов)
- Низкая температура размягчения и деформации у большинства материалов



Рисунок 5.4 Пример фотополимерной печати

Для решения каких задач подходят фотополимеры

В зависимости от типа материала, применяемой технологии и оборудования, фотополимерные материалы могут решать широкий круг производственных, творческих и научных задач:

- Печать мастер-моделей для литья в силикон
- Печать выжигаемых литейных мастер-моделей

- Быстрое прототипирование для различных целей
- Печать образцов для проверки собираемости
- Производство тестовых образцов продукции
- Печать пресс-форм для небольших серий

Виды и свойства фотополимерных материалов

1. Фотополимеры для профессиональных 3D-принтеров

К этой группе относятся вещества, используемые для построения в большинстве 3D-принтеров серии ProJet компании 3D Systems и 3D-принтерах серии Objet компании Stratasys (Рисунок 5.5).

- Фотополимеры VisiJet серий M3, M5 и FTX — применяются в 3D-принтерах ProJet. Общее количество — около 20. Каждый из материалов обладает одним характерным свойством (например, повышенная прочность, выжигаемость, прозрачность и пр.). Подробнее с характеристиками каждого из материалов этой серии вы можете ознакомиться здесь.
- Фотополимеры серий Vega и Tanga — применяются в 3D-принтерах Objet. Каждый материал (также как и в случае с VisiJet) отличается характерными свойствами, прозрачностью или цветом.



Рисунок 5.5 Изделия из фотополимеров

2. Фотополимеры для промышленных 3D-принтеров

- Материалы серии VisiJet SL — используются в промышленных SLA-машинах ProJet 6000/7000 компании 3D Systems. Включают в себя максимальный выбор физических свойств.
- Фотополимеры серии Somos — применяются в 3D-принтерах компании Uniontech. Есть водостойкие, термостойкие, высокопрочные, прозрачные и другие материалы.



Рисунок 5.6 3D-принтеры, печатающие фотополимером

5.1.3. Композитный (гипсовый) порошок

Гипсом в 3D-печати принято называть специальный мелкодисперсный композитный порошок, который называется VisiJet PXL. Он используется для печати в 3D-принтерах серии ProJet x60 компании 3D Systems, работающих по технологии Color Jet Printing.

Композитный порошок на основе гипса используется в системах 3D-печати ProJet x60 компании 3D Systems.

Главные характеристики: возможность полноцветной печати и низкая себестоимость.

Что печатают:

- прототипы для визуальной оценки;
- презентационные образцы продукции;
- научные визуализации;
- сувенирная продукция;
- архитектурные и ландшафтные макеты.

Основные характеристики гипсовых моделей:

- Возможность создания полноцветных объектов (до 390 000 оттенков).
- Низкая себестоимость.
- Детализация — 0,1 мм.
- Средняя прочность.
- Возможность повторного применения неиспользованного порошка.
- Возможность придания дополнительных свойств моделям за счет пост-обработки.

Какие объекты обычно печатают с помощью гипсового порошка (Рисунок 5.7):

- Архитектурные, конструкторские и ландшафтные макеты.
- Миниатюрные копии людей.
- Презентационные образцы продукции, визуализации.
- Прототипы для визуальной оценки и маркетинговых исследований.
- Различные уникальные сувениры.
- Объекты для образовательных, научных целей.



Рисунок 5.7 Пример печати гипсовым порошком

Характеристики гипсового композита.

VisiJet PXL — белый порошковый материал, который окрашивается в нужный цвет во время склеивания слоев. Толщина слоя печати – 100 микрон. Изделия из гипсового порошка отличаются высокой детализацией и прекрасными презентационными качествами.

Важное качество печати из гипса — для построения сложных моделей не нужен отдельный материал поддержки. В качестве «основы» для печати модели служит неиспользованный порошок, который в дальнейшем просеивается и используется для печати новых изделий.



Рисунок 5.8 3D-принтеры, печатающие гипсом

5.1.4. Воск

Воск — материал для 3D-печати, используемый для производства высокоточных выплавляемых мастер-моделей

Воск используется для печати высокоточных литейных мастер-моделей 3D-принтерами ProJet серии CPX.

Главные характеристики: высокая точность, гладкие поверхности, выплавляемость при 60°C.

Что печатают:

- выплавляемые литейные мастер-модели - восковки (Рисунок 5.9).



Рисунок 5.9 Литейная мастер-модель

Основные свойства воска:

- Низкая температура плавления (около 60°C).
- Хрупкость (относительно других материалов для 3D-печати).
- Прекрасная детализация и качество поверхностей.

Назначение. Главное (и практически единственное) назначение восковых материалов в 3D-печати — изготовление высокоточных литейных моделей (Рисунок 5.10).

Отрасли:

- ювелирное производство,
- машиностроение,
- исследования,
- обучение.

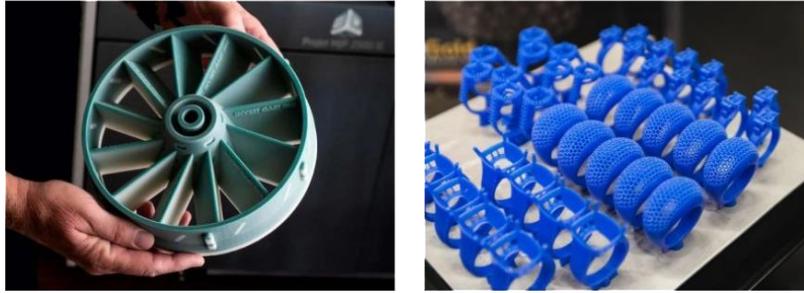


Рисунок 5.10 Высокоточные литейные модели



Рисунок 5.11 3D-принтеры, печатающие воском

5.1.5. Металлические порошки

Металлические порошки — самый прочный материал для 3D-печати. Изделия, созданные на металлических 3D-принтерах, по многим параметрам превосходят аналоги, произведенные с помощью традиционных технологий (литье, прокатка и др.).

В 3D-печати используется широкий набор порошков популярных металлов и сплавов: от алюминия до титана.

Главные характеристики: прочность, превосходящая традиционное литье, любая геометрия изделия.

Что печатают:

- прототипы для испытаний;
- тестовые образцы продукции;
- детали для ремонта;
- готовые к эксплуатации изделия.

Основные характеристики изделий из металлического порошка:

- Повышенная прочность.
- Любая геометрия.
- Большой выбор металлов и их сплавов.
- Шероховатые поверхности.
- Отсутствие напряженности металла.
- Любая пост-обработка.
- Материал поддержки используется для повторной печати.

Технологии 3D-печати металлом

- Selective Laser Melting (SLM) — селективное сплавление порошкового материала с помощью лазера, самая популярная технология 3D-печати металлами. Используется в 3D-принтерах по металлу компаний SLM Solutions и Realizer.

- Direct Metal Printing (DMP) — аналог технологии SLM, использующийся в 3D-машинах серии ProX компании 3D Systems.
- Electron Beam Melting (EBM) — спекание металлических порошков под воздействием электронно-лучевой пушки. Применяется в 3D-принтерах компании Arcam.

Примеры изделий - на рисунке 5.12.

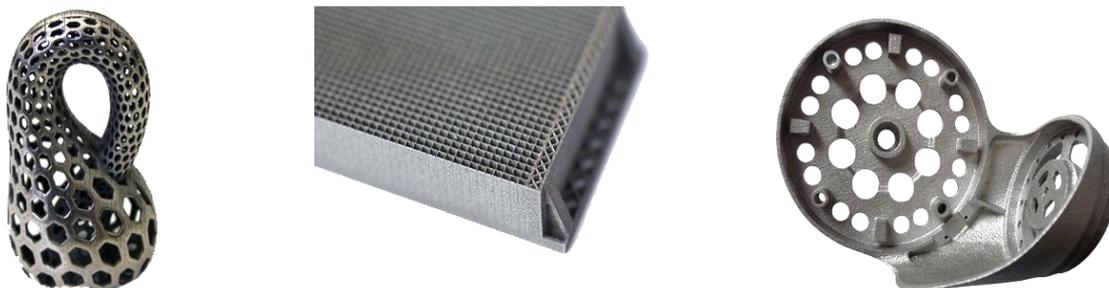


Рисунок 5.12 Примеры изделий из металлических порошков

Виды металлических порошков для 3D-печати:

- Титан. Высокопрочный биосовместимый материал, применяемый в медицине, авиастроении, машиностроении, промышленности.
- Инструментальная и нержавеющая сталь. Различные сплавы стали — самые распространенные материалы для 3D-печати. Они служат для решения широкого круга задач в различных сферах, устойчивы к коррозии, обладают повышенной прочностью и износостойкостью.
- Алюминий и его сплавы. Легкий сплав, обладающий более низкой плотностью, чем другие металлы для 3D-печати. Обладает хорошими легирующими свойствами и электропроводностью. Используется в автомобилестроении, аэрокосмической отрасли, промышленности.
- Кобальт-хром. Устойчивый к коррозии биосовместимый материал. Обладает высокой прочностью, используется в медицине и стоматологии, а также отраслях с высокими температурами.
- Никелевые сплавы. Материал с прекрасной механической прочностью и свариваемостью. Устойчив до 7000°C. Используется в авиации, энергетике, производстве инструментов и других отраслях.
- Другие сплавы и металлы. 3D-принтеры могут использовать для печати широкий набор материалов. По вашему техническому заданию машина может быть настроена для работы практически с любыми другими типами металлов: вольфрамом, никеле-кадмиевыми сплавами, железом, медью и т.д.

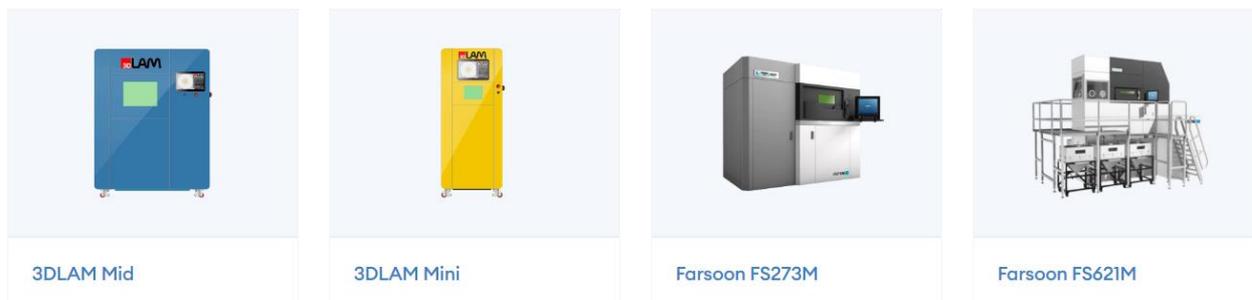


Рисунок 5.13 3D-принтеры, печатающие различными видами металла

5.1.6. *Литейный песок*

Понятие «песок» в 3D-печати объединяет группу песчаных порошкообразных материалов. Основное назначение — прямая печать форм для литья металлических изделий. Основным производителем 3D-машин для изготовления подобных форм является немецкий концерн ExOne

Песчаные 3D-принтеры используются в серийном и инновационном литейном производстве.

Главные характеристики: высокая точность готовых форм, различные физические свойства.

Что печатают:

- готовые песчано-полимерные литейные формы для производства металлических изделий (Рисунок 5.14).



Рисунок 5.14 Литейные формы для производства металлических изделий

Обычно песчано-полимерные формы используются при литейном производстве в машиностроении и промышленности. Однако известны случаи их эффективного применения в архитектуре, дизайне и других сферах.

Особенности песчаных литейных форм, созданных на 3D-принтере (Рисунок 5.15):

- Точность до 100 микрон.
- Толщина слоя: 0,28-0,5 мм.
- Могут использоваться без пост-обработки (например, запекания).
- Размер готовой формы: до 2,2 м.



Рисунок 5.15 Виды литейных форм

Виды песчаных материалов:

- Кварцевый песок (Silica sand) — наиболее распространенный материал для создания песчано-полимерных литейных форм. Используется для решения широкого спектра литейных задач в разных областях. При использовании

совместно со связующим в виде фурановых смол, форма из кварцевого песка не нуждается в запекании и сразу после очистки готова к заливке.

- **Керамический песок (CeraBeds)** — песчаный материал из синтетических гранул сферической формы. Обеспечивает минимальное термическое расширение, высокую огнеупорность, минимальный пригар и пористость на отливках. Совместим со всеми связующими веществами. Рекомендован для литья сталей и их сплавов.
- **Хромированный песок (Chromite)** — состоит из хрома и оксидов железа. Рекомендован для литья сталей и чугуна. Высокая теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения обеспечивают прекрасную стабильность формы. Может смешиваться с кварцевым песком, позволяя получать изделия с максимально качественными поверхностями.
- **Циркониевый песок (Zircon)** — используется в литейном процессе, когда нужно увеличить производительность. Температура плавления 2500°C, плотность по Моосу 7,5, высокий коэффициент теплового расширения. Смешивается с кварцевым песком для лучшего рассеивания тепла.
- **Оксид железа** — добавка для предотвращения образования пустот и неровностей. Используется для профилактики дефектов литейных форм.

Технология 3D-печати песчано-полимерных форм

3D-принтеры для печати песчаных литейных форм работают по технологии ExOne Binder Jetting. Это распространенный способ аддитивного производства, адаптированный для промышленных задач с использованием литейного песка.



Рисунок 5.16 3D-принтеры, печатающие песчаные формы

5.1.7. Схема выбора подходящего материала для 3D-печати

Существует множество материалов и доступных вариантов 3D-печати, поэтому сделать правильный выбор бывает трудно.

Предлагается трехэтапная схема выбора подходящего материала для 3D-печати.

Этап 1: определение функциональных характеристик.

Пластмассы, используемые для 3D-печати, обладают различными химическими, оптическими, механическими и тепловыми характеристиками, которые влияют на свойства моделей, созданных с помощью 3D-печати. По мере перехода от сценария предполагаемого использования к реальным условиям эксплуатации требования к функциональным характеристикам соответственно возрастают (Табл. 5.1).

Таблица 5.1 Определение функциональных характеристик

ТРЕБОВАНИЕ	ОПИСАНИЕ	РЕКОМЕНДАЦИИ
Низкая эффективность	<p>Для прототипирования пресс-форм и посадок, концептуального моделирования, исследований и разработок напечатанные модели должны отвечать только низким функциональным характеристикам.</p> <p>Пример: прототип пресс-формы для половника, предназначенного для эргономических испытаний. Кроме качества поверхности, никаких требований к функциональным характеристикам не предъявляется.</p>	<p>FDM ПЛА SLA: стандартные полимеры, Clear Resin (прозрачность), Draft Resin (быстрая печать)</p>
Средняя эффективность	<p>С целью валидации или предпроизводственного использования напечатанные модели должны обладать свойствами, максимально схожими со свойствами окончательных производственных моделей, для функционального тестирования, но не удовлетворять строгим требованиям относительно срока службы.</p> <p>Пример: корпус электронных компонентов для защиты от внезапных ударов. Функциональные характеристики включают способность поглощать энергию ударов. Кроме того, корпус должен защелкиваться и сохранять свою форму.</p>	<p>FDM АБС SLA: инженерные полимеры SLS: Nylon 11 Powder, Nylon 12 Powder, Термопластичный полиуретан (ТПУ-Flex/TPU)</p>
Высокая эффективность	<p>Для получения изделий для конечного применения окончательные модели, созданные с помощью 3D-печати, должны обладать высокой устойчивостью к износу в течение определенного периода времени, будь то сутки, неделя или несколько лет.</p> <p>Пример: подметки обуви. Среди функциональных характеристик — тщательное тестирование на срок службы с циклической нагрузкой и разгрузкой, стойкость цвета в течение многих лет, а также, помимо прочего, сопротивление разрыву.</p>	<p>FDM композитные материалы SLA: инженерные, медицинские, стоматологические или ювелирные полимеры SLS: Nylon 11 Powder, Nylon 12 Powder, ТПУ, композитные материалы из нейлона</p>

Этап 2: преобразование функциональных характеристик в требования, предъявляемые к материалу.

После определения функциональных характеристик вашего продукта следует преобразовать их в требования, предъявляемые к материалу: свойства материала, которые будут удовлетворять этим требованиям. Эти показатели обычно приводятся в технических характеристиках материала (Табл. 5.2).

Таблица 5.2 Преобразование функциональных характеристик в требования, предъявляемые к материалу

ТРЕБОВАНИЕ	ОПИСАНИЕ	РЕКОМЕНДАЦИИ
Предел прочности на разрыв	Устойчивость материала к разрушению под натяжением. Высокий предел прочности на разрыв важен для структурных, несущих, механических или статических моделей.	FDM ПЛИА SLA: Clear Resin, Rigid Resin SLS: Nylon 12 Powder, композитные материалы из нейлона
Модуль изгиба	Устойчивость материала к сгибанию под нагрузкой. Свидетельствует либо о жесткости (высокое значение), либо о гибкости (низкое значение) материала.	FDM ПЛИА (высокое значение), АБС (среднее значение) SLA: Rigid Resin (высокое значение), Tough Resin и Durable Resin (среднее значение), Flexible Resin и Elastic Resin (низкое значение) SLS: композитные материалы из нейлона (высокое значение), Nylon 12 Powder (среднее значение)
Удлинение	Устойчивость материала к разрушению при растяжении. Позволяет сравнить степень растяжения гибких материалов. Также свидетельствует о том, растягивается ли материал или сразу разрушается.	FDM АБС (среднее значение), ТПУ (высокое значение) SLA: Tough Resin и Durable Resin (среднее значение), Flexible Resin и Elastic Resin (высокое значение) SLS: Nylon 12 Powder (среднее значение), Nylon 11 Powder (среднее значение), ТПУ (высокое значение)
Ударная вязкость	Способность материала поглощать удары и их энергию, не разрушаясь. Свидетельствует о жесткости и долговечности. Позволяет определить, насколько легко разрушается материал при падении на землю или столкновении с другим объектом.	FDM АБС, нейлон SLA: Tough 2000 Resin, Tough 1500 Resin, Grey Pro Resin, Durable Resin SLS: Nylon 12 Powder, Nylon 11 Powder
Температура изгиба под нагрузкой	Температура, при которой образец деформируется под определенной нагрузкой. Свидетельствует о том, подходит ли материал для применения в условиях высокой температуры.	SLA: High Temp Resin, Rigid Resin SLS: Nylon 12 Powder, композитные материалы из нейлона
Твердость (дюрометр)	Устойчивость материала к поверхностной деформации. Позволяет определить нужную степень пластичности мягкой пластмассы, такой как резина и эластомеры, для конкретного способа применения.	FDM ТПУ SLA: Flexible Resin, Elastic Resin SLS: ТПУ
Сопrotивление разрыву	Устойчивость материала к появления надрезов под натяжением. Этот показатель важен для оценки долговечности и износостойкости мягкой пластмассы и гибких материалов, таких как резина.	FDM ТПУ SLA: Flexible Resin, Elastic Resin, Durable Resin SLS: Nylon 11 Powder, ТПУ
Ползучесть	Ползучесть — это склонность материала к необратимой деформации под влиянием постоянного напряжения: натяжения, сжатия, сдвига или изгиба. Низкая ползучесть указывает на долговечность твердых пластмасс и очень важна для структурных моделей.	FDM АБС SLA: Rigid Resin SLS: Nylon 12 Powder, композитные материалы из нейлона
Остаточная деформация при сжатии	Необратимая деформация после сжатия материала. Важный показатель для мягкой пластмассы и способов применения, где нужна эластичность. Свидетельствует о том, восстановит ли материал свою первоначальную форму после снятия нагрузки.	FDM ТПУ SLA: Flexible Resin, Elastic Resin SLS: ТПУ

Этап 3: выбор.

После преобразования функциональных характеристик в требования, предъявляемые к

материалам, вы, скорее всего, сможете узнать, какой материал или небольшая группа материалов подходят для вашего способа применения.

Если вашим основным требованиям отвечают несколько материалов, для окончательного выбора можно рассмотреть более широкий диапазон желаемых характеристик, а также преимущества и недостатки этих материалов и процессов.

5.2 Выбор 3D принтера

Настоящая методика предназначена не столько облегчить сам процесс выбора 3D-принтера, сколько вооружить правильным подходом и методикой принятия решения, обратить внимание на особенности, учет которых обеспечит успешное решение задач, а как результат, удовлетворение от использования этой передовой техники [26-29].

Несмотря на относительно молодой возраст активного внедрения в повседневную жизнь устройств аддитивного построения, примерно 10-15 лет, в настоящее время получили распространение несколько основных технологий их реализации, а производителей представлено уже почти необозримое множество.

Большинство подобных руководств, выложенных на различных сайтах поставщиков, сводятся к выбору основной технологии исходя из требуемого материала, а затем уже к рекламе тех или иных производителей в рамках выбранного решения. Умело манипулируя читателем, авторы пытаются под видом помощи избавить потенциального покупателя оборудования от принятия решения, сделать это за него, навязать готовый вывод:

Если Вам нужно строить недорогие детали из пластика, тогда выберите технологию X, а наиболее популярный (продвинутый, раскрученный) производитель Y предлагает Вам модель принтера Z, которая обеспечит Ваше счастье и процветание.

Чаще всего разочарование результатом использования инновационной технологии возникает не от неверного выбора технологии или производителя, и даже не от неудачно выбранной конкретной модели. Негатив, как правило, возникает от изначально неверной оценки класса требуемого оборудования, уровня его оснащенности, оценки его способности постоянной круглосуточной работы или гибкости для возможных экспериментов. Если привести грубый пример по ассоциации с эпитафией, Будет разочарован и владелец дорогого лимузина при попытке нагрузить его несколькими кубометрами строительных материалов, и водитель карьерного самосвала при попытке подъехать на нем к «Большому театру». Поэтому будет предложена другая логика принятия решения – по следующим этапам:

1. Определение класса оборудования на основе планируемого режима использования.
2. Выбор возможных технологий в данном классе. Не все технологии представлены одинаково широко в каждом классе, и причины этого будут отдельно рассмотрены. Далее для каждого класса будет описан разный дальнейший алгоритм выбора.
3. Критерием выбора технологии станут требования к материалам, к точности/разрешению процесса 3D-печати, исходя уже из конкретных поставленных задач. На этом этапе следует учесть вектор дальнейшего развития вашей деятельности.
4. Уже после выбора класса и технологии (одной или нескольких подходящих), будут рассмотрены варианты их технической реализации. Упор будет сделан на возможные расходные материалы и степень их вариативности, а также наиболее важные опции каждого технического решения для получения ожидаемых результатов.
5. И только как примеры по мере изложения будут приводиться конкретные модели устройств различных производителей.

Логика и порядок наших действий: Класс оборудования → возможные технологии → набор требуемых материалов → требования по точности/разрешению → выбор технического решения → примеры конкретных его реализаций различными производителями → принятие Вами самостоятельного решения по выбору

Классы устройств аддитивного построения – 3D-принтеров.

С самого начала для взаимопонимания важно договориться о единой терминологии. Термином «3D-принтер» сегодня пытаются называть все – от недорогого сборного конструктора для детского творчества до промышленной установки аддитивного построения стоимостью более миллиона долларов. Точно как под понятие «автомобиль» подходит и фура, и маленькое спортивное купе. Озадачиваясь вопросом выбора оборудования на самом начальном этапе, необходимо решить, что Вы подразумеваете под этим понятием. Предлагается разделить все аддитивные устройства на три основных условных класса, внутри которых уже обозначить дополнительные категории:

1. «Персональные» или «настольные» - предназначены для личного/индивидуального пользования без требований по помещению.
2. «Профессиональные» - устройства, предназначенные для осуществления работы инженеров, дизайнеров, конструкторов, но не связанные с определенным производственным процессом. Они легко могут быть размещены в офисе или конструкторском бюро.
3. «Промышленные» или «Производственные» – установки аддитивного построения, изначально предназначенные для глубокого внедрения в производственный процесс. Рассчитаны на большую загрузку и постоянную круглосуточную работу при необходимости. Как правило, эта группа устройств имеет специальные требования к помещению.

Класс «Персональные/настольные»

Это относительно недорогие принтеры, которые используются дома или на рабочем месте в режиме персонального использования. Разделение на классы условное и вовсе не значит, что настольные принтеры невозможно использовать в работе. Некоторые компании оказывающие услуги аддитивного построения, объединяют несколько настольных принтеров в «фермы», распределяют загрузку, таким образом, используют устройства этого класса как производственное оборудование. Существует и множество профессиональных принтеров, которые легко поместятся на рабочем столе. Не размер играет определяющую роль. Важно, что изначально персональные/настольные не предназначены для специализированной деятельности, и они не рассчитаны на внедрение в индустриальный производственный процесс.

Основные признаки «персонального/настольного» 3D-принтера:

1. Относительно невысокая стоимость, как самого устройства, так и расходных материалов.
2. Компактность – поместится на рабочем столе. Низкий или средний уровень безопасности.
3. Отсутствие требований к размещению: дома в детской комнате, в гараже, в офисе, у конструктора на столе – да где угодно. Питание от обычной розетки 220 вольт.
4. Простой понятный интерфейс, легкость в использовании, нет требований к высокой квалификации пользователя. Прилагается наглядное «Руководство пользователя».
5. Понятие «пуско-наладочные работы» отсутствует – открыл коробку, достал устройство, включил, заправил расходный материал, начал работать. Техническое обслуживание и замену ресурсных элементов способен выполнить сам пользователь.

6. Расходные материалы широкодоступны к покупке в большом количестве различных интернет магазинов, без предварительного заказа. Как правило, запасные части, ресурсные сменные элементы, аксессуары.
7. В результате себестоимость детали или модели получается невысокой.

Дополнительные категории настольных/персональных 3D-принтеров.

Конструкторы «собери сам» - набор дешевых китайских комплектующих, из которых пользователем самостоятельно собирается установка. Эта категория носит международное название RepRap. Предназначена для творчества и саморазвития. Требуется навыки в сборке моделей и устройств, но не требует глубоких знаний аддитивных технологий, потому что в результате получается простейшее устройство с минимальными функциями-возможностями. Пригодно только для развлечения, процесс сборки-настройки важнее, чем результаты 3D-печати. Ни о каком качестве и повторяемости результатов печати речь не идет.

Домашние «бытовые» - недорогие аппараты, обычно с открытой камерой построения, часто без подогрева платформы и только с одним экструдером. Продаются полностью готовыми к работе – этим в основном и отличаются от предыдущей категории. В остальном всё то же самое: минимум опций и возможностей, минимальный набор рекомендованных расходных материалов. Годаются для детского творчества, для первичного знакомства с аддитивными технологиями в домашней обстановке. Однако некоторые полезные для домашней семьи предметы уже можно делать самостоятельно, например ажурную салфетницу как на иллюстрации.

Персональные рабочие инструменты (инженера, конструктора, дизайнера и т.п.) – самая обширная и распространенная категория устройств, вплотную приближающаяся по возможностям к классу профессиональных. Представлены как модели для работы с фотополимерными смолами, так и «продвинутые» настольные принтеры для печати пластиковой нитью (технологии описаны ниже). С закрытой камерой и двумя или более экструдерами для работы с несколькими материалами.

На рынке представлены модели, уже способные использовать новейшие инженерные материалы-термопласты. Идеальный персональный инструмент для углубленного изучения аддитивных технологий и тестирования новых материалов. Однако, для профессионального использования у персональных 3D-принтеров недостаточен ресурс и точность-повторяемость полученных моделей. К принтерам этой категории часто ошибочно предъявляют требования как к классу «профессиональных». Такая установка может стоить слишком дорого для личного приобретения «домой», но вполне приемлемо даже для небольшой компании.

На персональных 3D-принтерах можно изготавливать рабочие детали и оснастку небольшими тиражами при не самых строгих требованиях к качеству поверхности и точности размеров. Их объединяют в фермы бюро по оказанию 3D-печати как платных услуг. Работа на оборудовании этой категории позволит получить достаточный опыт пользователю для дальнейшего шага к работе на устройстве профессионального класса.

Примеры популярных на рынке персональных устройств верхнего уровня: Picaso Designer X PRO (Россия), 3DGence DoubleP255 (Польша), Raise3D Pro2 (Китай) и Flashforge Hunter DLP - фотополимерный (Китай).

В каких случаях следует выбрать класс настольных/персональных 3D-принтеров:

1. При небогатом опыте работы или отсутствии знаний и понимания аддитивных технологий – это самый главный критерий. Когда нужен инструмент для начального или углубленного изучения аддитивных технологий.
2. При очень ограниченном бюджете. Также при необходимости получать модели с максимально низкой себестоимостью при небольших начальных вложениях. При организации стартапа по оказанию платных услуг по 3D-печати.

3. Когда нужно быть максимально независимым в выборе материалов – покупать их буквально «на каждом углу». Когда важна возможность тестирования новых материалов.
4. Домой себе и/или детям. Подростку купите 3D-ручку, 3D-принтер – это для старшеклассника или студента с начальными навыками использования электрических инструментов или приборов.

Выбрать класс устройства Вам поможет Таблица сравнения признаков классов аддитивных устройств (Табл. 5.3).

Класс «Профессиональные»

Это самый разнообразный класс устройств, как по доступным базовым аддитивным технологиям, так и по различным реализованным техническим решениям. Одной фразой они характеризуются «только для профессионального использования». Первые аддитивные устройства, созданные еще в прошлом веке, сразу позиционировались именно в таком классе. Сегодня же определить принадлежность конкретной модели именно к данному классу не всегда удаётся просто и однозначно – он находится как «между молотом и наковальней». На пятки профессиональным моделям наступают продвинутые персональные 3D-принтеры, а профессиональные устройства аддитивного построения сами вплотную приближаются к промышленным решениям.

Для верного определения нужно понять и прочувствовать истинное предназначение устройств этого класса. Они были созданы и продолжают создаваться для обеспечения максимально возможных: сложности формы получаемых и качества поверхности напечатанных моделей, особых свойств разнообразных используемых инженерных материалов. Свойства полученных прототипов деталей должны быть максимально приближены к оригиналам, изготовленным по традиционным технологиям, а в некоторых случаях и превзойти возможности неаддитивных способов производства. При этом себестоимость и скорость 3D-печати порой приносятся в жертву реализации максимальных возможностей. Лозунг класса таков: «Сложная форма, высокое качество и особенные материалы любой ценой!»

Основные признаки «профессионального» 3D-принтера:

1. Средняя или высокая стоимость, самого устройства, расходных материалов.
2. Размер такого принтера может быть от миниатюрного до большого. Вообще в этом классе размер значения не имеет. Высокий уровень безопасности, иногда нужен допуск.
3. Рассчитаны на размещение в служебных помещениях общего назначения: конструкторское бюро, архитектурный отдел, научно-исследовательский институт или больница. Возможно требование по трехфазному электропитанию 380 вольт.
4. У оператора такого принтера должен быть высокий уровень профессиональных знаний/навыков, как в аддитивном производстве, так и в области применения устройства.
5. Пуско-наладочные работы, техническое обслуживание, замену ресурсных элементов выполняет сертифицированный сервисный инженер авторизованного дистрибьютора или дилера. Эти виды услуг отдельно оговариваются в Контракте на поставку оборудования.
6. 3D-принтеры могут быть аппаратно защищены от применения «сторонних» расходных материалов. Если же применение сторонних материалов допустимо и предусмотрено Производителем, предлагается список рекомендованных материалов и профилей настроек для работы с ними. Качество получаемого результата не гарантируется при работе с материалом не из «списка рекомендованных».

7. В результате себестоимость изделия, средняя или высокая. Качество, сложность формы и свойства материала полученного результата будут уникальными, а порой просто непостижимыми для непосвященных в аддитивные технологии.

Дополнительные категории профессиональных 3D-принтеров.

Узкоспециализированные закрытые устройства специального назначения. К данной категории сразу отнесем 3D-принтеры для использования в ювелирной промышленности для печати выжигаемых и выплавляемых форм. Стоматологическое аддитивное оборудование для изготовления брекетов, хирургических шаблонов и т.п. К категории профессиональных, а не производственных, такие устройства относятся по двум признакам: не требуют особого помещения, не используют материалы в промышленном количестве. Они близки к производственным, потому что глубоко встроены в производственные процессы. Закрытые, защищенные расходные материалы, в некоторых случаях даже «чипованные» картриджи оправданы строгостью требований к материалам из медицинских или узкоотраслевых соображений. Могут быть небольшими по размерам и не очень производительными, и по этим признакам также относятся к профессиональным, а не производственным. Примером узкоспециализированного профессионального 3D-принтера может послужить устройство американского производителя 3D Systems ProJet MJP 3600W. Оно печатает только специальным воском выплавляемые формы для ювелирного или литейного производства.

Принтеры для прототипирования деталей перед производством традиционным способом. Важно: прототипы могут быть как функциональные, то есть имитирующие прочностные свойства будущего изделия, так и для «проверки на собираемость». Когда важно получить прототип точной и достаточно сложной формы, но он может быть непрочным и недолговечным. К этой же категории отнесем «полноцветные» аппараты, имитирующие внешний вид будущего объекта, фактически создающие «визуальные прототипы». Набор применяемых материалов может быть не таким уж широким, устройство может быть как защищено от использования сторонних «расходников», так и открытым. Это не так критично, как для предыдущей категории специального назначения, потому что требования не такие жёсткие. Пример: UnionTech Pilot 450 (Китай) – стереолитографическая установка общего назначения, открытая для использования фотополимеров сторонних производителей.

3D-принтеры широкого профиля для исследований свойств различных материалов. Вам нужен гибкий резиноподобный прототип высокого качества поверхности – пожалуйста, прозрачная деталь – запросто! Огнеупорная негорючая прокладка – да легко! Сегодня Вы печатаете поликарбонатом, завтра полипропиленом, послезавтра новомодным высокотемпературным химически инертным материалом РЕЕК(полиэфирэфиркетон), а потом обычным пластиком для настольных принтеров? Тогда для Вас оптимален профессиональный 3D-принтер широкого профиля. Только помните, что универсальность дорого стоит, да и материалы порой очень и очень недешевые. Однако то, что Вы сможете создать, способно повергнуть в шок даже выдавшего все виды (кроме аддитивного построения) конструктора. Хороший пример - FDM установка INDUSTRY F420 польского производителя 3DGence. Благодаря temperируемой подогреваемой камере и трём сменным печатающим головам она способна использовать абсолютно все (это не опечатка!) представленные на рынке материалы термопласты в виде нити.

Устройства аддитивного построения с большой рабочей камерой. Условно примем, что если сумма трёх измерений (ширина+длина+высота) рабочей камеры устройства равна или превышает 2 метра, то это уже устройство с большой камерой. От настольных оно отличается тем, что на столе его разместить уже не удастся. Да и ценник такого 3D-принтера, если он реально способен создавать большие детали, явно выйдет за границы класса персональных моделей. Это связано с возрастающими в кубе при увеличении габаритов техническими проблемами при конструировании – и рама должна быть жесткой, и производительность высокой, иначе результатов аддитивного построения придётся ждать

годами. При увеличении линейных размеров изделия в 2 раза его объем, вес, время построения увеличивается ... в 8 раз! В качестве примера годится немецкий BigRep ONE с рабочей камерой 1м x 1м x 1м

В каких случаях следует выбрать класс профессиональных 3D-принтеров:

1. Если вам надо «не в игрушки играть, а делом заниматься», для осуществления профильной деятельности предприятия на ежедневной основе в режиме 24/7.
2. Если бюджет позволяет приобрести устройство такого класса: условно от нескольких десятков тысяч до нескольких сотен тысяч долларов.
3. Когда себестоимость полученного прототипа, оснастки или опытного образца не играет роли. Главное – возможность изготовления абсолютно уникального или высокоспециализированного объекта.
4. Когда Вы готовы попасть в зависимость от дорогостоящих и не всегда доступных «по первому свистку» расходных материалов. Или наоборот, Вы готовы экспериментировать с различными материалами, даже не зная заранее, получится приемлемый результат или нет. Вам важна сама возможность проведения подобных экспериментов.
5. Пожалуй, самое главное и определяющее успех применения подобного устройства у вас на предприятии – наличие квалифицированного персонала. Никогда не приобретайте профессиональное устройство первым! Или если Вы решитесь на такой рискованный шаг, сначала «купите» опытного оператора. Самые лучшие операторы-профессионалы по опыту, это энтузиасты, у которых дома есть персональный 3D-принтер, они понимают и чувствуют аддитивное построение, но уже переросли своего домашнего любимца и хотят более серьезного применения своим навыкам.

Важно: не технология аддитивного построения определяет класс устройства, а наоборот. Сделать правильный выбор класса устройства Вам поможет Таблица сравнения признаков классов аддитивных устройств (Табл. 5.3).

Класс «Промышленные производственные 3D-принтеры»

Определить принадлежность установки аддитивного построения к этому классу, в каком-то смысле, проще. Если нужно половину цеха промышленного предприятия выделить – это точно «производственный» 3D-принтер. Сложнее определить тот момент, когда вам уже пора перейти от профессионального к промышленному устройству. Это произойдет, когда вы точно определите то место в вашем производственном процессе, применение в котором аддитивной технологии даст устойчивый экономический эффект уже не в рамках вашего отдела перспективных разработок, а в масштабах всего промышленного или даже индустриального предприятия. Промышленные производственные аддитивные установки просто обязаны вследствие своей высокой производительности потреблять расходные материалы мешками или бочками. Себестоимость получаемых изделий, заготовок или оснастки может быть как низкой, так и высокой, но она должна быть существенно ниже аналогичных затрат при традиционных способах производства. А еще должно сокращаться время производства конечной продукции завода, и не только за счет сокращения времени на одном участке, где применено аддитивное построение, но и за счет оптимизации всех производственных процессов благодаря внедрению новых аддитивных технологий. Экономический эффект должен быть не просто заметным, он должен стать значительным, иначе внедрение промышленного 3D-принтера не дало ожидаемого эффекта.

Основные признаки «промышленного производственного» 3D-принтера:

1. Высокая стоимость самого устройства, но низкая у расходных материалов.
2. Размер такого принтера обычно большой. Индустриальный уровень безопасности, обязателен допуск службы техники безопасности предприятия.

3. Рассчитаны на размещение в цеху промышленного предприятия с особыми требованиями по климату, вибрациям, запыленности и т.п. Как правило, трехфазное электропитание 380 вольт, иногда на десятки киловатт.
4. Вся бригада операторов такого принтера должна обладать высоким уровнем профессиональных знаний высококвалифицированных работников промышленного предприятия. Профильное обучение, регулярные курсы повышения квалификации обязательны. Предыдущий опыт работы на аддитивных устройствах желателен, но... необязателен. Потому что работа на подобном оборудовании ближе к управлению индустриальных станков с ЧПУ, чем к экспериментам на домашнем персональном принтере.
5. Пуско-наладочные работы, техническое обслуживание и замену ресурсных элементов выполняет сертифицированный сервисный инженер Производителя или его регионального представителя. Эти виды услуг неотделимы от поставки оборудования.
6. Расходные материалы поставляются мешками, бочками, ведрами и в индустриальных объемах. Нет и речи о поиске и покупке их на рынке в процессе работы. Контракт на поставки расходных материалов с крупными поставщиками подписывается на долгий срок одновременно с запуском оборудования или даже заблаговременно заранее. «Высшим пилотажем» при использовании промышленной аддитивной установки считается организация вторичного использования сырья после переработки использованной оснастки/заготовок.
7. В результате себестоимость получаемой производственной оснастки, заготовок или деталей обязана должна стать значительно ниже произведенных ранее по традиционной технологии, а срок всего производственного цикла/процесса существенно сократиться.

Дополнительные категории профессиональных 3D-принтеров

Их оказывается всего две: «узкоспециализированные» и «широкого применения».

Узкоспециализированные закрытые устройства специального назначения. Они способны выполнять всего одну определенную технологическую операцию, но мегаэффективно. В другой статье на данном сайте подробно рассмотрены устройства для прямого изготовления песчаных форм в литейной промышленности. При грамотной загрузке оборудования экономический эффект получится астрономический, а сокращения времени отдельных операций возможно от нескольких месяцев до одних суток! Примеры узкоспециализированных промышленных устройств: установки для прямого изготовления песчаных литейных форм (без модельной оснастки) ExOne (Германия), VoxelJet (США) и FHZL (Китай).

Производственные установки широкого применения, в отличие от одноименных профессиональных устройств, не работают на широком спектре материалов. На промышленных принтерах набор сырья всегда ограничен экономической и производственной целесообразностью. Широкое применение в данном случае надо понимать буквально. На устройстве с очень большой рабочей камерой (до десяти кубометров или даже больше) печатают и модельную оснастку, и сборочные стапели, и вышедшие из строя детали другого промышленного оборудования - то, что в данный момент нужнее. Наибольшей популярностью этот класс оборудования пользуется в ремонтных подразделениях крупных концернов, состоящих из целого ряда заводов. Ширина применения получается как по виду напечатанных деталей, так и территориальная. Грамотное применение устройства данного класса способно сократить время простоя основного оборудования на порядок – до нескольких недель до нескольких часов. Тогда косвенный экономический даже эффект от одного случая применения может превысить немалую стоимость аддитивной установки. В качестве примера можно привести шведскую установку аддитивного построения послойного наплавления пластика из гранул (FGF) BLB Industries The BOX.

В каких случаях следует выбрать класс промышленных 3D-принтеров:

1. Если применение данного устройства обеспечит значительный экономический эффект в рамках всего индустриального предприятия, либо существенно снизит длительность производственного цикла.
2. Если бюджет позволяет приобрести устройство такого класса: от нескольких сотен тысяч долларов до ... страшно даже представить.
3. Когда себестоимость полученных оснастки, заготовок или деталей будет значительно ниже произведенных по традиционной технологии, например, на фрезервальном станке с ЧПУ.
4. Если Вы не только нашли постоянных поставщиков расходных материалов для промышленных установок, но и задались целью организовать вторичное использование переработанного сырья.
5. Когда Вы готовы выделить под это оборудование половину или целый цех вашего завода и бригаду высококвалифицированных промышленных работников.

Подведём итоги.

Изначальная ошибка в определении класса приобретаемого оборудования может привести к обратному эффекту от его внедрения. Из опыта продаж разочарование у покупателя возникло после попытки использования настольного персонального принтера как профессионального, потому что деталь сложной формы не удалось напечатать (ни с первого, ни с десятого раза). Более того, ограничения по возможностям стало «откровением» для пользователя: «Как, разве на нём нельзя напечатать всё, что я хочу? Я же по телевизору видел!»

После постоянного ежедневного использования такой принтер прожил всего 3 месяца и пришел в полную негодность, хотя это была далеко не самая дешевая и простая модель вполне уважаемого производителя. Суть ошибки – в режиме работы профессионального персональный 3D-принтер и не справился с задачами, и не выдержал нагрузки. Сэкономленный при покупке бюджет обернулся потерянными деньгами, а аддитивные технологии так и не были внедрены в процессы R&D у покупателя. Такое же разочарование возникнет от попытки промышленного использования устройства профессионального класса – недостаточная производительность и высокая себестоимость полученной оснастки не позволит получить тот самый ощутимый экономический эффект, а «эксперименты ради экспериментов» на индустриальном уровне не приветствуются.

Выбор в любом случае за покупателем, исходя из задач и располагаемого бюджета, но для помощи в принятии решения в единую таблицу собраны все формальные признаки аддитивного оборудования трех описанных классов. Возможно, вовремя проставленные «крестики» наведут Вас на мысль об увеличении бюджета на приобретение или уменьшение его (если ваши задачи, помещение и персонал еще «не доросли» до класса оборудования, изначально запланированного к покупке).

Таблица 5.3 Сравнение признаков классов аддитивных устройств

Признаки / класс →	Настольные персональные	Профессиональные	Промышленные производственные
Основные цели использования 3D-принтера (FDM)	Хобби, обучение, мелкий ремонт (печать запчастей), услуги, детское творчество	Прототипирование, R&D, испытания материалов, специализированные услуги	Замена традиционных технологий на аддитивные на основном производстве
Уровень стоимости 3D-принтера	Низкий (< \$5000)	средний или высокий (\$5000-\$500 000)	Высокий или очень высокий (\$500 000 - ∞)
Производительность 3D-принтера (МЛ)	Очень низкая или низкая (не более 1 кг/сутки)	От низкой до средней (до 10 кг в сутки)	От высокой до очень высокой (до 50-60 кг/час)
Уровень разрешения, качества поверхности, сложности формы готовых объектов	От низкого до среднего (0.2 мм для персональных фотополимерных устройств)	От высокого до очень высокого (разрешение до 0.05 мм)	От низкого до высокого –зависит только от требований конкретного производства
Размер рабочей камеры	Небольшой (до 30x30x30 см)	Любой - не имеет значения	От среднего до большого (несколько кубических метров)
Уровень подготовки персонала (опыт работы)	От начального до продвинутого (до 1 года опыта)	От продвинутого до профессионального (2-3 года)	Должен соответствовать промышленным стандартам
График работы 3D-принтера	Эпизодический, несколько часов в день максимум	Способен работать несколько суток подряд без перерыва	Рассчитан на круглосуточный режим работы
Стоимость расходных материалов	Розничная низкая или средняя (для инженерных материалов)	Средняя или высокая (чипованные картриджи)	Низкие или средние оптовые цены
Доступность расходных материалов	В интернет-магазинах «на каждом углу»	У авторизованных дилеров или профильных поставщиков	В промышленных объемах по контракту поставки
Использование материалов сторонних производителей	Должно быть открыто	Закрывается или с ограничениями (без гарантии результата)	Должно быть согласовано с Производителем
Требования к помещению	Отсутствуют	Служебное помещение общего назначения	Промышленное помещение, строгие требования
Требования по электропитанию	Бытовая розетка 220 Вольт	Однофазное 220 Вольт или трехфазное 380 Вольт	Индустриальное 380 Вольт до нескольких десятков киловатт
Уровень безопасности работы на устройстве	Низкий (для конструктора самосборки) или средний	Высокий	Соответствие стандарту промышленной безопасности
ПНР и техническое обслуживание	ПНР отсутствует, обслуживание проводит пользователь	Только инженер авторизованного дилера	Только представители Производителя
Себестоимость полученных напечатанных объектов	Несущественная или низкая	От средней до высокой	От низкой до средней, но ниже традиционного производства

Основные технологии аддитивного построения.

После определения класса устройства которое вас интересует, необходимо выбрать основную аддитивную технологию, подходящую для решения Ваших задач. Следующая диаграмма, позаимствованная с ресурса 3dhubs.com, показывает вам насколько много существует технологий аддитивного построения и какими основными игроками рынка они

продвигаются (Рисунок 5.17).

Однако, эта диаграмма уже устарела и не содержит нескольких очень интересных реализаций 3D-печати. Это произошло не потому, что уважаемые исследователи рынка что-то просмотрели, а потому что и рынок и технологии развиваются настолько стремительно, что информация о них устаревает каждые полгода. Не следует углубляться в особенности и разнообразие всех технологий – это тема совсем другой статьи. «Как же так? – спросите Вы, – это же самое главное – правильно выбрать технологию!» Нет, самое главное – подобрать эффективное решение вашей задачи, ради которой Вы обратились к покупке 3D-принтера. Так вот, как Вы увидите очень скоро, одну задачу можно решить несколькими способами и несколькими разными технологиями, а вот эффективность ее решения гораздо сильнее зависит от правильно выбранного класса оборудования, конкретного технического решения и квалификации вашего персонала. Если у вас нет профессионального водителя, то дизельная у вас или бензиновая фура роли уже не играет. И наоборот, если вы собрались поехать в Большой театр, то не так важна автоматическая коробка на вашей легковой машине или ручная – задача будет решена успешно. Важно Вам «дать удочку, а не рыбу» – вооружить Вас правильным подходом к принятию решения.

Итак, согласно стандарту ISO/ASTM 52900 различают всего семь основных принципиальных типов аддитивного построения. Именно они находятся сверху диаграммы, давая начало всему дальнейшему развитию реализаций аддитивных технологий.

Вот следует сосредоточимся опять же для установки единой терминологии:

- Material extrusion = *Построение экструзией материалов* (FDM) – Нагретый и расплавленный материал-термопласт избирательно дозируется через сопло или отверстие. Важно: рабочий материал не обязательно в виде нити, может быть и в гранулах (FGF).
- Vat photopolymerization = *Полимеризация в резервуаре* (SLA, DLP или LCD) – Жидкий фотополимер в резервуаре селективно отверждается ультрафиолетовым излучением. Источником такого излучения может быть как лазер, так и проектор.
- Powder bed fusion = *Селективное спекание или сплавление порошкового материала* (SLS, DMLS & SLM) – источник высокой энергии избирательно плавит частицы порошка, равномерно слой за слоем наносимого от платформы.
- Material jetting = *Струйная трехмерная печать материала* (MJ) – Капли жидкого материала наносятся струйной печатающей головкой, выборочно осаждаются и отверждаются.
- Binder jetting = *Струйное нанесение связующего* (BJ) – Жидкий связующий агент наносится струйной печатающей головкой, избирательно связывает участки слоя равномерно нанесенного порошкового материала.
- Direct energy deposition = *Прямая наплавка материала высокой энергией* (LENS, LBMD) – Высокоэнергетический источник сплавляет материал при его осаждении.
- Sheet lamination = *Послойное листовое ламинирование* (LOM, UAM) – Листы материала вырезаются для достижения формы и наносятся (приклеиваются, ламинируются) послойно.

ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES



Find out more at www.3dhubs.com/what-is-3d-printing



Рисунок 5.17 Технологии аддитивного построения

На настоящем этапе важно не разнообразие реализаций этих основных технологий, а как они соотносятся с классами аддитивного оборудования. Не все технологии представлены во всех классах, и этому есть логичное объяснение (Табл 5.4).

Таблица 5.4 Соотношение технологии с классом аддитивного оборудования

	Настольные персональные	Профессиональные	Промышленные производственные
Material extrusion (FDM) Построение экструзией материалов	+	+	+
Vat photopolymerization (SLA, DLP, LCD) Полимеризация в резервуаре	+	+	+
Powder bed fusion (SLS, DMLS & SLM) Селективное спекание или сплавление порошкового материала	-	+	+
Material jetting (MJ) Струйная трехмерная печать материала	-	+	-
Binder jetting Струйное нанесение связующего (BJ)	-	+	+
Direct energy deposition (LENS, LBMD)(MJ) Прямая наплавка материала высокой энергией	-	+	+
Sheet lamination (LOM, UAM) Послойное листовое ламинирование	-	+	-

Причины такого неравенства достаточно объективны: не все технологии могут обеспечить простоту и невысокую стоимость 3D-принтера для класса «персональных» и не все могут достичь производительности и низкой себестоимости, чтобы подойти классу «промышленных». А вот в классе «профессиональных» представлены все технологии – это очевидно, только так можно достичь всего разнообразия возможностей, ради чего и существует этот класс оборудования. К этой таблице можно будет вернуться и дальше, а на настоящем этапе этой информации уже достаточно, чтобы двигаться дальше по намеченному логическому пути выбора. А на Вашем пути встает камень как в сказке про Илью Муромца – три пути (по классам оборудования).

Выбор технического решения настольного персонального 3D-принтера.

От камня вы повернули налево – в сторону настольного решения. Двигайтесь дальше по намеченному маршруту: набор требуемых материалов -> требования по точности/разрешению -> выбор технического решения

Набор требуемых и возможных материалов

Выбор и невелик и велик одновременно. С одной стороны, Вы ограничены только двумя основными технологиями: Экструзия материала и фотополимеризация. Вам доступны только термопласты в виде нити или жидкие фотополимеры, но их представлено на рынке уже великое множество. Таблица 5.5 далее подскажет каким набором материалов вы сможете печатать исходя из категории настольного принтера:

Таблица 5.5 Соотнесение материалов с категорией принтера

Категория персонального принтера	Технология 3D-печати	Доступный набор материалов
Конструктор «собери сам»	Экструзия материала (FDM)	Только PLA и его производные
Домашний «бытовой»	Экструзия материала (FDM)	Только PLA и его производные
Персональный рабочий инструмент	Экструзия материала (FDM), печать двумя материалами	Широкий выбор основных материалов и поддержки Смолы для технологии LCD/DLP
	Фотополимеризация (LCD, DLP)	

Соотнесите набор материалов с вашими потребностями, убедитесь в возможности их реализации и переходите к следующему этапу. Для «собери сам» и «домашнего» путь выбора завершен.

Требования по точности/разрешению и выбор технического решения

Этот этап выбора имеет смысл только для категории персонального рабочего инструмента. Рассмотрим три варианта требований.

1. Требуются максимально возможное разрешение и гладкая поверхность моделей. Разнообразием материалов и размером рабочей камеры можно пожертвовать -> Настольный 3D-принтер с LCD-дисплеем. Сейчас такие устройства стоят очень недорого, в пределах 50-70 тысяч рублей. Если LCD элемент имеет разрешение 1920x1080 (Full HD), то камера получится совсем небольшой – буквально несколько сантиметров. Путь увеличения – выбор устройства с панелью 2К или 4К.

Примеры подобных устройств: iSUN LCD 3.0 или Wanhao Duplicator 7 Plus, оба с разрешением LCD дисплея 2К: 2560x1440. Важный момент: LCD-панель имеет ограниченный ресурс, всего около 1000 часов. Поэтому если Вы собираетесь работать много, а не от случая к случаю, и работоспособность 3D-принтера для вас критична, советуем обратить внимание на устройство с проектором DLP. Как пример можно привести Flashforge Hunter. Ресурс DLP принтеров будет намного выше, но и цена тоже. В соотношении ресурса к цене Вы выиграете существенно.

2. Требуется печать прочных объектов, но достаточно простых по форме (геометрии). Вам подойдет настольный FDM принтер с закрытой камерой с одним экструдером. Поддержки вы сможете печатать только тем же материалом, что и основной объект, но для простой геометрии это вполне допустимо. Закрытая камера позволит использовать материалы с повышенной термоусадкой, такие как ABS и нейлон, зато они значительно прочнее PLA. Поверхность полученных изделий будет слоистой. Снизить такой эффект можно выбором сопла с малым диаметром, например 0.2-0.3 мм, и печати слоем 0.1 мм, но за это придется заплатить более низкой производительностью. Выберите принтер со сменными соплами. Пример подобного 3D-принтера: Picaso Designer X PRO (Россия). На рынке подобных устройств очень много, выбор у вас будет богатый.
3. Нужны максимальные возможности по использованию разных материалов и печати предметов со сложной геометрией. А гладкость поверхности пусть не так критична. Выберите решение с двумя (или более) экструдерами для возможности печати растворимой поддержки совместно с основным материалом. Удалить поддержку растворением получится и из самых труднодоступных мест вашей детали/изделия. Возможность пользоваться самыми различными материалами обеспечит закрытая камера, подогреваемый стол и нагрев экструдера до температуры 400°C. Но будьте готовы заплатить за такой 3D-принтер уже 300 000 рублей и больше. Примеры: Picaso Designer X PRO (Россия), 3DGence Double P255 (Польша), Raise3D Pro2 (Китай), Ultimaker 3 (Нидерланды). Выбор нужно делать аккуратно – конструктивно принтер с двумя экструдерами сложнее одноэкструдерного, и качественно их умеют делать только крупные известные производители.

Персональный 3D-принтер можно покупать в интернет-магазине даже без предварительной подробной «очной» демонстрации. Конкретную модель Вам представит продавец-консультант. Почитайте в блогах отзывы различных пользователей. Делайте выбор исходя из своих финансовых возможностей и бюджета – для персональных принтеров это нормально. Лучше выберите проверенную простую модель от известного производителя, чем «навороченную» неизвестного. Скорее всего, вторая работать не будет или будет недолго. Обратите внимание на наличие русского интерфейса и наглядной документации. Особенно это будет полезно, если вы (с вашим ребенком) только начинаете изучать аддитивные технологии. Сразу обеспечьте себя стартовым комплектом расходников.

Начните с печати простых моделей, бесплатно распространяемых в интернете. Двигайтесь постепенно от простого к более сложному, и вы обязательно полюбите 3D-печать.

Если прошло время, и вы осознали, что вам нужен 3D-принтер и с высоким качеством поверхности, и с возможностью применения различных материалов (в том числе очень прочных) для печати объектов сложной геометрии, то таких настольных персональных принтеров не существует. Вам пора рассмотреть класс профессиональных устройств.

Выбор технического решения профессионального 3D-принтера

Широкий выбор применимых материалов и технологий усложняет процесс выбора. Возможно почти всё, но нюансы кроются именно в слове «почти»: почти идеально гладкая поверхность, почти точное воспроизведение размеров, почти максимально достижимая теоретически прочность и т.п.

Для начала давайте вспомним, какие основные категории профессиональных 3D-принтеров мы обозначили:

1. Узкоспециализированные устройства специального назначения
2. 3D-Принтеры для прототипирования
3. 3D-принтеры широкого профиля
4. Устройства аддитивного построения с большой рабочей камерой

Алгоритм выбора технического решения для каждой категории так же подчиняется обозначенной ранее логике: возможные технологии -> набор требуемых материалов -> требования по точности/разрешению -> выбор технического решения. Но есть различия в нюансах и аспектах, на которые с первую очередь следует обратить внимание. Рассмотрим по порядку.

Выбор узкоспециализированного профессионального 3D-принтера

Вы выбираете не устройство, а готовое технологическое решение для вашей узкой отрасли – допустим, ювелирного производства или зубоврачебной клиники. Набор материалов регламентирует технология основного производства или медицинские стандарты безопасности. Экспериментам тут не место. Обратитесь к специализированному интегратору – поставщику аддитивных решений для Вашей отрасли. Запросите полный набор разрешительной и регламентирующей документации, подробное описание технологии. Попросите (или нет, даже потребуйте) ознакомиться с внедренным ранее решением. Если для этого нужно поехать за рубеж, то нужно это обязательно сделать. Почему так строго? Потому что цена ошибки – бесполезно потраченные на приобретение устройства финансовые средства. Вы не сможете применять несовместимое по технологическим или юридическим причинам аддитивное оборудование. И напротив: вовремя предоставленная вам разрешительная документация и углубленные консультации по внедрению сэкономят вам как финансовые средства, так и драгоценное время.

Итак, единственно верный путь выбора узкоспециализированного профессионального оборудования – обращение к специализированному интегратору с опытом внедрений. Все необходимое для принятия решения вам покажут, расскажут и продемонстрируют. Дублировать работу узких профессионалов в настоящей статье не имеет смысла.

Выбор профессионального 3D-принтера для прототипов и широкого профиля

Алгоритм выбора такого оборудования практически совпадает, рассмотрим его как общий. Разница заключается только в том, что для устройства прототипирования допустим закрытый принцип использования расходных материалов. В некотором смысле он даже полезен, так как обеспечивает предсказуемый результат и постоянные параметры напечатанных прототипов год назад, вчера, сегодня и завтра. Принтер широкого профиля для проведения R&D по применению в вашей отрасли и технологическом процессе различных новых материалов конечно должен быть «открытым». Во всем остальном алгоритм идентичен:

Определите, с какими материалами Вы собираетесь работать и после этого сделайте предварительный выбор одной или нескольких из 7 описанных технологий. В этом Вам

поможет следующая схема (Рисунок 5.18):

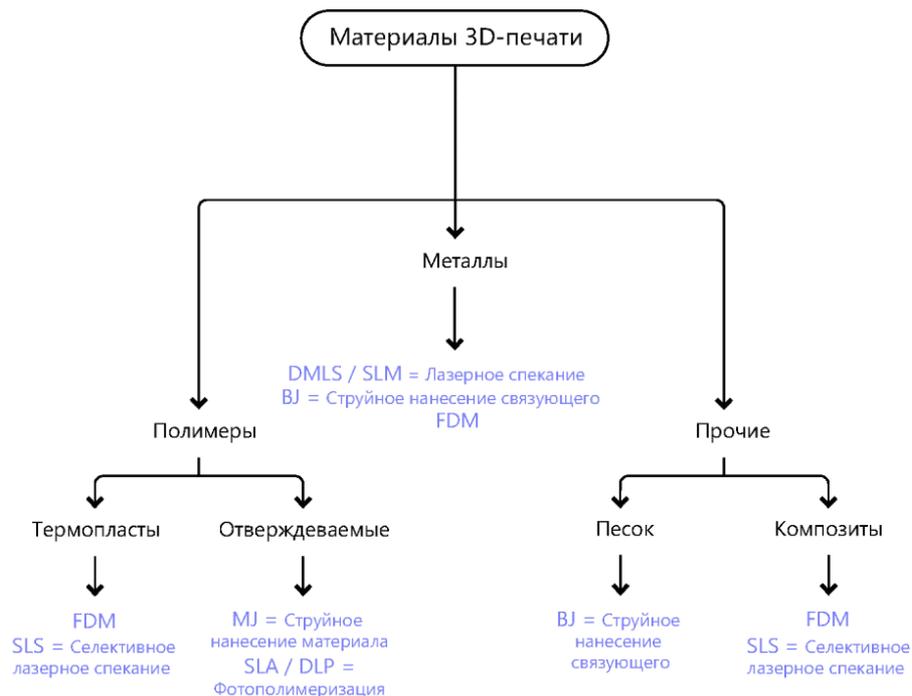


Рисунок 5.18 Выбор технологии печати по материалу

Определите, что важнее для Вашего прототипа: размеры для проверки на собираемость, прочностные характеристики, термо- и химическая устойчивость или имитация внешнего вида будущего изделия (детали, оснастки). То же самое, если вы будете изготавливать не прототипы, а сами детали или оснастку из самых различных материалов – все равно постарайтесь ответить на вопрос: «Что мне важнее?» После этого пройдите по стрелкам следующей диаграммы и снова определите возможные технологии (Рисунок 5.19):

Ваши главные требования к отпечатку на 3D-принтере

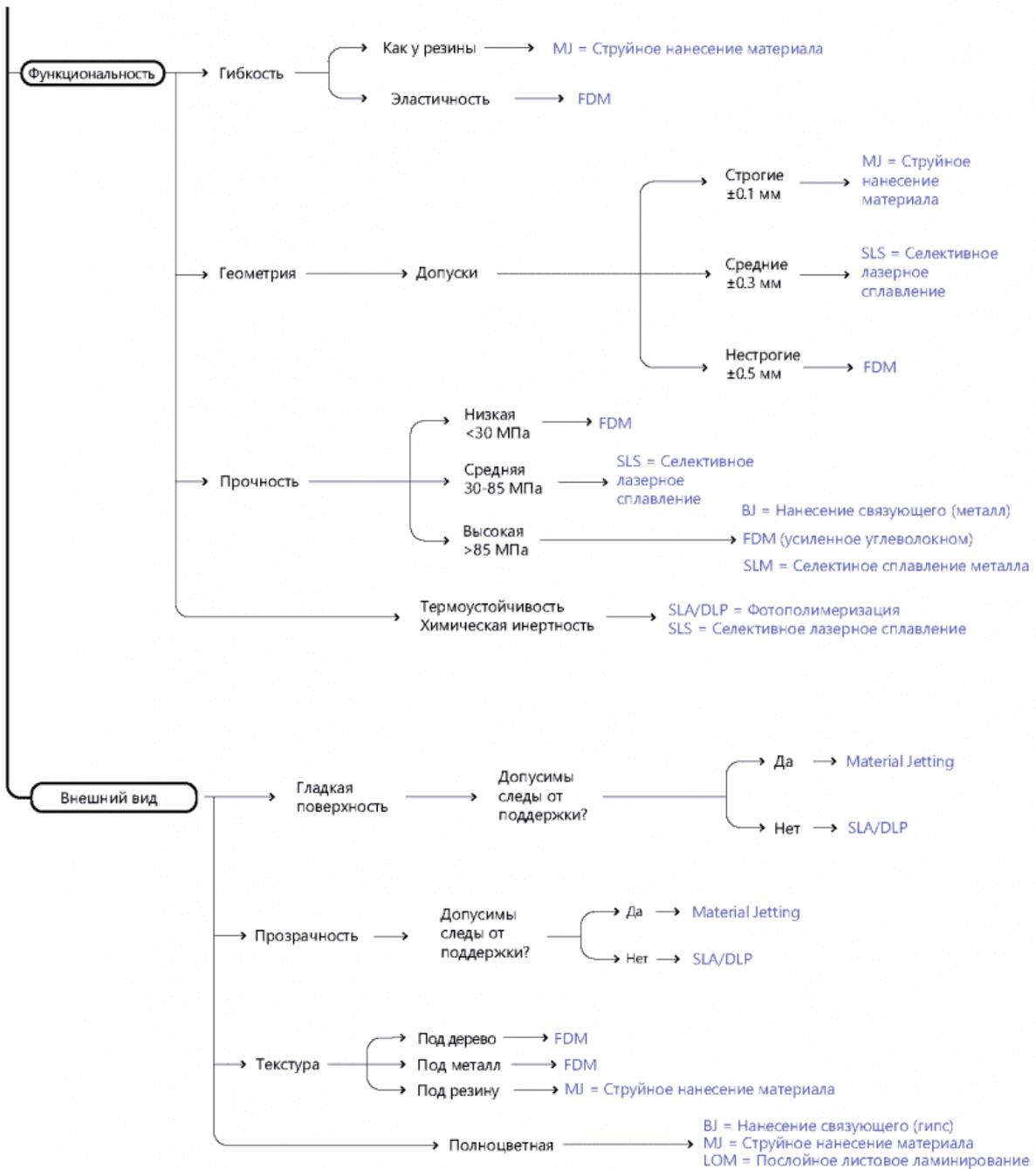


Рисунок 5.19 Выбор технологии печати по требованиям к образцу

Пересечение вашего выбора по этим двум диаграммам (Рисунки 5.18 и 5.19) даст самого вероятного кандидата. Если допустимых технологий осталось две или три – это даже хорошо, ваши задачи могут быть решены разными способами, и есть выбор по бюджету. Помните пример про Большой театр?

Следующий этап отбора – самый важный. Оцените возможности отобранных технологий-кандидатов справиться с требуемой геометрией ваших прототипов или опытных образцов. Для этого изучите следующую таблицу (Рисунок 5.20):

ПРАВИЛА ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИИ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ПО ОСНОВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ



	Стенка с опорой	Стенка без опоры	Структуры поддержки	Выступающие и углубленные элементы	Горизонтальные балки	Отверстия	Детали с совмещением	Отверстия для высыпания	Минимальный элемент	Диаметр штыря	Допустимое отклонение
	Стены, которые соединены с остальной частью отпечатка, как минимум с двух сторон.	Неподдерживаемые стены соединяются с остальной частью отпечатка менее чем с двух сторон.	Максимальный уклон плоскости может быть напечатан без поддержки.	Элементы модели, которые выступают или углублены ниже поверхности.	Балка, которую технология может печатать без поддержки.	Минимальный диаметр отверстия, который технология может успешно напечатать.	Рекомендуемый зазор между двумя соединяющимися частями.	Минимальный диаметр отверстий для удаления лишнего материала.	Рекомендуемый минимальный размер элемента, чтобы он не перестал печататься.	Минимальный диаметр штыря, который может быть напечатан.	Ожидаемый допуск (точность размеров) конкретной технологией.
Экструзия материала (FDM)	0.8 мм	0.8 мм	45°	0.6 мм ширина и 2 мм высота	10 мм	Ø2 мм	0.5 мм		2 мм	3 мм	±0.5% (не менее ±0.5 мм)
Стереолитография	0.5 мм	1 мм	поддержка нужна всегда	0.4 мм ширина и высота		Ø0.5 мм	0.5 мм	4 мм	0.2 мм	0.5 мм	±0.5% (не менее ±0.15 мм)
Селективное лазерное сплавление	0.7 мм			1 мм ширина и высота		Ø1.5 мм	0.3 мм для движущихся и 0.1 мм для совмещаемых	5 мм	0.8 мм	0.8 мм	±0.3% (не менее ±0.3 мм)
Струйная печать материала	1 мм	1 мм	поддержка нужна всегда	0.5 мм ширина и высота		Ø0.5 мм	0.2 мм		0.5 мм	0.5 мм	±0.1 мм
Струйное нанесение связующего	2 мм	3 мм		0.5 мм ширина и высота		Ø1.5 мм		5 мм	2 мм	2 мм	±0.2 мм для металла и ±0.3 мм для песка
Прямая наплавка металла	0.4 мм	0.5 мм	поддержка нужна всегда	0.1 мм ширина и высота	2 мм	Ø1.5 мм		5 мм	0.6 мм	1 мм	±0.1 мм

Рисунок 5.20 Возможности отобранных технологий-кандидатов справиться с требуемой геометрией прототипов

Если в результате остался только один вариант – замечательно. Если же выбор так и не сделан, то возьмите более экономичное устройство. Другой важный аспект, способный повлиять на ваш окончательный выбор – перспектива дальнейшего развития технологии, появления новых материалов с недоступными ранее свойствами. На этом экономить не рекомендуется. А далее конкретную модель и производителя вам подскажет системный интегратор. Техника такого уровня в интернет-магазине «на углу» не покупается. Посетите демо-зал интегратора или участок с уже внедренным оборудованием, закажите тестовую печать и подробный расчёт ее себестоимости, выясните порядок заказа и закупки расходных материалов. Договоритесь о сроке поставки оборудования, он может оказаться до полугода, это нормально. Оговорите отдельно проведение ПНР (пуско-наладочных работ) и регламентного технического обслуживания. Полный цикл проекта по поставке профессионального аддитивного устройства занимает до года.

Выбор профессионального оборудования с большой камерой построения

Еще раз вспомните, что означает в нашей терминологии «большая рабочая камера». Это камера с суммой измерений по длине-ширине-высоте от 2м, например 70см*70см*60см. Этот критерий практически сразу оставляет две технологии: FDM и фотополимеризацию = SLA (стереолитографию). Устройства изготовления песчаных литейных форм по технологии VJ относятся к «промышленным» – вы это дальше увидите. Далее выбор достаточно прост – если не жалко финансовых средств на дорогую фотополимерную смолу и устройство стоимостью до миллиона долларов, но необходима очень высокая точность и гладкая поверхность, выберите SLA. Если бюджет поджимает, да и материалы такие дорогие нежелательны – выберите FDM, но будьте готовы к трудоёмкой постпечатной обработке – шлифованию, галтовке, шпаклёвке, покраске. Потому что поверхность получится слоистая – толщина слоя у FDM-принтеров с большой камерой может достигать 1мм, это сильно заметно и в некоторых случаях неприемлемо.

Пример выбора профессионального 3D-принтера

Давайте пройдем шаг за шагом описанный алгоритм для примера. Пусть мы – фабрика по производству мопедов. Нам нужно устройство для прототипирования рабочих деталей. Ответим на вопросы по порядку:

1. Принтер нам нужен для профильной деятельности – Да.
2. Каким бюджетом мы располагаем? – Пусть \$100 000, примерно по порядку величины.
3. Помещение общего назначения у нас есть – Да, конструкторское бюро выделит комнату.
4. Специалист у нас есть – да, у молодого конструктора есть дома простенький 3D-принтер, он с удовольствием пойдет по пути профессионального роста в аддитивных технологиях.

Тогда первый этап выбора совершен – мы купим профессиональное устройство.

1. Мы точно знаем, какие детали или оснастку мы будем печатать? Есть готова поставленная технология – нет.

Это устройство точно не будет узкоспециализированным.

1. Какими материалами мы хотим работать? – Металл или пластмасса, также желательно эластичные материалы для прототипов маслоупорных прокладок.
2. Нам важны функциональные свойства прототипов или визуальное представление – функциональные, причем нужны прочные и термоустойчивые до 200 °С.
3. Нас устраивает допуск по геометрии в 0.5 мм – да, вполне. На нашем основном производстве он не сильно лучше.
4. Нам важно иметь большую рабочую камеру? – Нет, мы не будем печатать раму мопеда, нам нужны прототипы деталей до 25-30 см.

Нам не нужно устройство с большой рабочей камерой.

Остались всего две технологии по перечисленным критериям: FDM и MJ, остальные постепенно отсеялись из-за широких требований к материалам и не самого большого бюджета.

Нам предложили «закрытый» 3D-принтер MJ с защищенными картриджами и «открытое» профессиональное FDM устройство, способное использовать высокотемпературные материалы PEEK, PEKK и PEI (Ультем), но также способное печатать эластичным термополиуретаном TPU гибкие плоские предметы. Именно на нем мы и сделали выбор. Пусть это будет FDM-принтер 3DGence INDUSTRY F420 с полным набором сменных печатных голов для возможности использования различных термопластов (Рисунок 5.21). Да и наш конструктор, хорошо знакомый с технологией FDM по своему домашнему любимцу, буквально с первого дня смог начать работу на новом устройстве без долгого подготовительного периода. Он будет пробовать все новые появляющиеся на рынке материалы, в том числе с высоким содержанием металла.

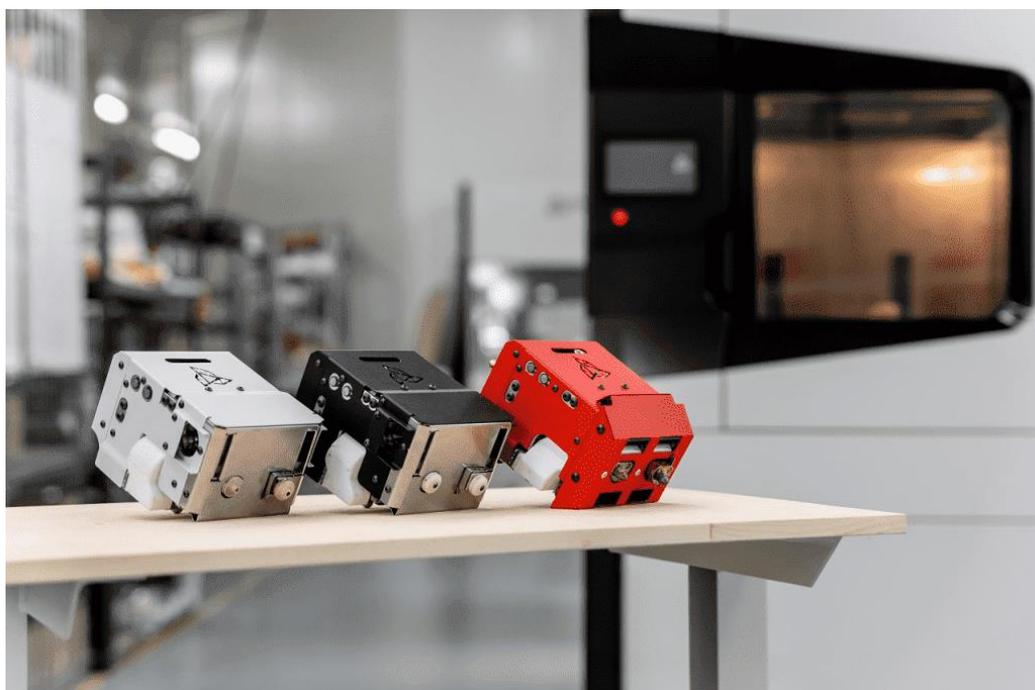


Рисунок 5.21 FDM-принтер 3DGence INDUSTRY F420 с полным набором сменных печатных голов

Специальная оговорка – это всего лишь выдуманый из головы пример, ваш путь и ваши критерии отбора будут другими, и вы выберете именно то устройство, которое даст вам максимальную эффективность применения.

Итоги: что важно при выборе и приобретении профессионального 3D-принтера

1. Четко обозначить задачи и условия его применения, чтобы выбрать категорию.
2. Убедиться, что у вас есть готовый квалифицированный персонал или озадачиться заранее его поиском.
3. Оценить доступный бюджет.
4. Определить пожелания по работе с материалами.
5. Четко обозначить требования по геометрии полученных отпечатков.
6. Определить какие основные технологии вам подойдут.
7. Выбрать одного или нескольких поставщиков-интеграторов 3D-решений, запросить у них коммерческое предложение требованиями к помещению с описанием расходных материалов: расход, стоимость, условия поставок и т.п.
8. Обязательно посетить демо-зал с wybranнми устройствами или компанию, которая уже внедрила и использует данное решение.

9. Заказать тестовые образцы. Не экономьте на этом – проигрыш при ошибке с выбором оборудования или материалов будет значительно выше.

10. Принять решение о приобретении.

Выбор технического решения промышленного 3D-принтера

Выбор промышленного решения проще относительно количества вариантов, но ответственность и цена ошибки выше. Эксперименты закончены, единственным критерием успеха внедрения будет экономический эффект в рамках всего предприятия. Как правило, предлагающие промышленные решения интеграторы готовы предоставить технико-экономическое обоснование, это облегчит вашу задачу. На первом этапе выбора нужно понять нужно вам узкоспециализированное оборудование или общего широкого профиля.

Информацию для принятия решения даст анализ ваших производственных процессов: участок традиционного производства, который вы планируете заменить на цех аддитивной технологии, производит однотипные детали и/или оснастку или продукцию разного назначения. Если продукция однотипная или, тем более, одинаковая, проанализируйте какими тиражами она производится. Аддитивные технологии не эффективны при больших тиражах одинаковых деталей или продукции. Возможно, вам следует поменять свое решение и найти другой участок применения 3D-принтера. Даже применение фрезеровального станка с ЧПУ может дать больший экономический эффект (Рисунок 5.22).

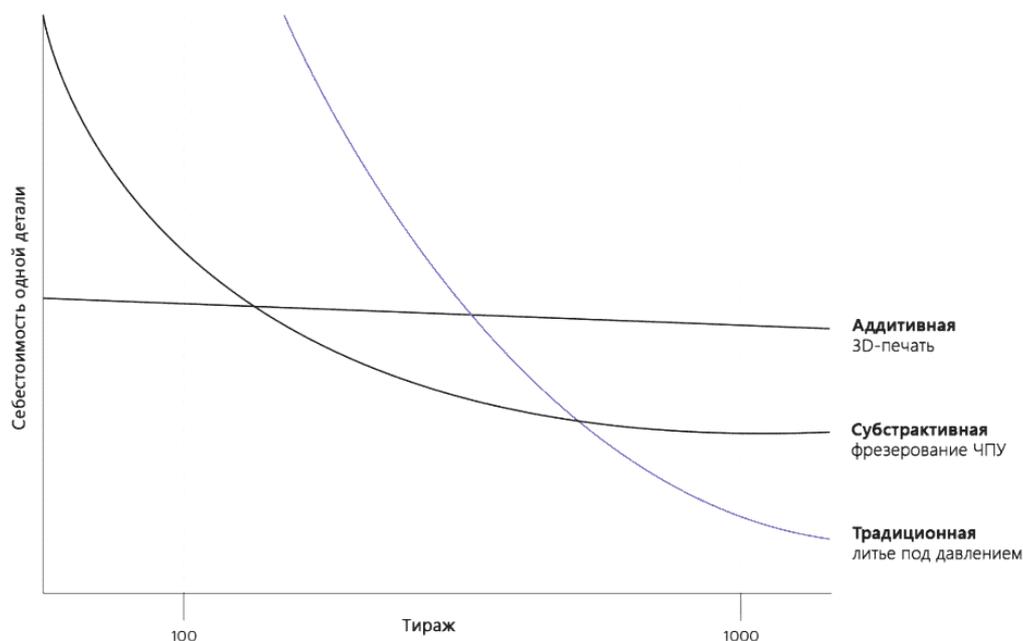


Рисунок 5.22 Зависимость себестоимости от масштаба производства

Если такую проверку ваше производство прошло, и вам надо производить однотипные детали из материалов сходных свойств (например: из цветных металлов) небольшими тиражами до 100 экземпляров, то внедрение узкоспециализированного устройства аддитивного построения может дать ожидаемый эффект. Примером подобных устройств могут быть промышленные установки по наплавке металла или установки по изготовлению песчаных форм для литья.

В случае, если тиражи, характер и тип изделий могут различаться. Более того, материалы могут применяться разные в зависимости от локальной задачи, следует остановить выбор на установке широкого профиля. В качестве примера могу привести установку послойного наплавления VLB Industries The BOX (Швеция), использующую в качестве сырья термопласты в гранулах. В зависимости потребности на ней можно строить и гидротехнические конструкции из водоупорного пластика, и модельную оснастку (формы) для литья «в землю», и сборочные стапели из прочного угленаполненного полиамида.

Израсходованную или сработанную оснастку достаточно просто и экономично перемолоть обратно в пластиковые гранулы и использовать повторно. Такие установки, использующие гранулированные термопласты в качестве сырья, производят и в США и в Китае, совмещая с фрезеровальным станком с ЧПУ для постобработки до достижения гладкой поверхности. Вариантов становится всё больше и больше, сырьё для промышленных аддитивных установок дешевеет, а выбор его увеличивается. Многие крупные концерны в США и Европе уже активно используют промышленные установки аддитивного построения: Boeing, Airbus, Ford, Deutsche Bahn и прочие. Сочетание на современном производстве всех трех видов технологических операций: традиционных, аддитивных и субтрактивных позволяет достичь уровней оптимизации производственных процессов совершенно недоступных ранее.

Со стороны Покупателя выбор оборудования для промышленного использования более похож на приобретение узкоспециализированного профессионального 3D-принтера. Техническое решение будет предложено на основе анализа потребностей и особенностей вашего производственного процесса. Это должны делать профессионалы уже даже не с двух, а с трех сторон: покупатель, интегратор и производитель. Проект оснащения промышленной аддитивной установкой обычно начинается с визита на завод-изготовитель.

Оборудование стоит недешево, и даже понимание высокого уровня культуры производства такой техники создаст доверие, необходимое для глубокой проработки проекта. Стадии изготовления тестовых отпечатков тоже следует провести до принятия окончательного решения. «Высшим пилотажем» будет привлечение производителя расходных материалов и тестовая печать именно из того сырья, которое вы заложили в ваш бизнес план. После этого следует проработка размещения оборудования и план подготовки цеха-участка аддитивного построения. Эти затраты также нужно учесть как «долгие» инвестиции.

После утверждения инвестиционного плана руководством предприятия последует стадия получения сертификатов на материалы, проработку соблюдения условий промышленной безопасности, обучение персонала. Квалифицированный оператор станка с ЧПУ способен освоить аддитивные технологии, но у новых процессов всегда есть свои слабые и подверженные риску стадии. Их нужно сначала изучить теоретически, а потом «почувствовать» уже в процессе эксплуатации. Как правило, обучение персонала проводят представители Изготовителя, они лучше всего знают своё оборудование и уже обладают опытом разрешения проблемных ситуаций. Неотъемлемой частью проработки проекта должно стать создание запаса ресурсных и заменяемых по регламенту частей. Простой такого оборудования недопустим, об этом следует позаботиться заранее.

Последим не менее важным этапом должно стать заключение долгосрочного контракта на регулярные поставки расходных материалов с четкими обязательствами по срокам поставки. Поставщик и производитель оборудования могут совпадать, а могут и быть совершенно разными организациями. Наилучшим вариантом даже для импортного оборудования станет использование российского сырья, если возможно – это обеспечит и устойчивость поставок и минимальную себестоимость. Пример: намного проще приобретать кварцевый песок для установок построения литейных форм в России, чем везти его вагонами из-за рубежа, благо это возможно и сырьё достаточного качества в нашей стране уже есть.

Итоги: что важно при выборе и приобретении промышленного 3D-принтера

1. Определить производственный участок его будущего применения
2. С помощью Интегратора и Производителя выбрать техническую реализацию
3. Оценить возможную экономическую эффективность от применения
4. Ознакомиться очно с потенциальным предприятием-производителем
5. Проработать план организации помещения, эти затраты – тоже инвестиционные
6. Подготовить подробный инвестиционный план и определить срок окупаемости

7. После одобрения инвестиционного плана подготовить разрешительную документацию
8. Заключить договора поставки, с обучением персонала, проведением пуско-наладочных работ, установки и настройки программного обеспечения подготовки заданий
9. Запланировать запас ресурсных частей согласно плану технического обслуживания
10. Организовать обучение персонала представителями производителя и интегратора
11. Заключить долгосрочный договор регулярных поставок расходных материалов
12. Начать работать, оптимизировать процессы на предприятии благодаря использованию новых возможностей и сокращения сроков. Этот процесс тоже не произойдет мгновенно.

Изложенные подход и алгоритмы получены благодаря опыту поставок Системного интегратора **i3D** (<https://i3d.ru>) аддитивного оборудования от настольных принтеров до промышленных установок. Этот опыт поможет вам в освоении этой новой и очень динамично растущей области человеческих знаний и умений, а также успешно и эффективно решить ваши задачи – от первого знакомства до полной перестройки производства индустриального предприятия.

5.3 Выбор 3D сканера

Сегодня 3D-сканирование занимает важное место в начале и конце производственного процесса, а также в процессе эксплуатации [30-32]. Инженеры, конструкторы, разработчики, дизайнеры и прочие специалисты используют 3D-сканер для начала создания цифровой модели детали, опираясь на уже созданную деталь (обратное проектирование), использование бионических форм или оцифровки сложных криволинейных поверхностей.

После производства, 3D-сканирование может быть применено для оценки точности получаемой детали путем сравнения математической модели детали со сканом. В процессе эксплуатации детали 3D-исследование поможет оценить износ и деформацию, и принять правильное и своевременное решение о ремонте или замене детали.

По типу 3D сканеры делятся на: ближнего действия (работают по принципу триангуляции на основе камер и устройства подсветки, в качестве которой может выступать маломощный лазер или структурированная подсветка) и дальнего действия, работающие по принципу измерения времени прохождения лазерного луча до объекта. Второй тип сканеров применяется для измерения крупных объектов, как правило, от нескольких метров и выше (здания, сооружения).

Основные применения.

1. Обратное проектирование – Решение задач по оцифровке оригиналов. Это необходимо если утеряны чертежи, или в деталь были внесены какие-то изменения и необходимо учесть их в модели детали. Возможность промышленного дизайна, оцифровка сложных поверхностей, полученных вручную при доработке детали по месту.

Основные критерии – удобство работы, точность и разрешение. Для таких задач стоит рассматривать стационарные решения (Рисунок 5.23) с автоматизированным поворотным столом. Если ваши детали габаритами до 1 м, вы хотите максимально автоматизировать работу.

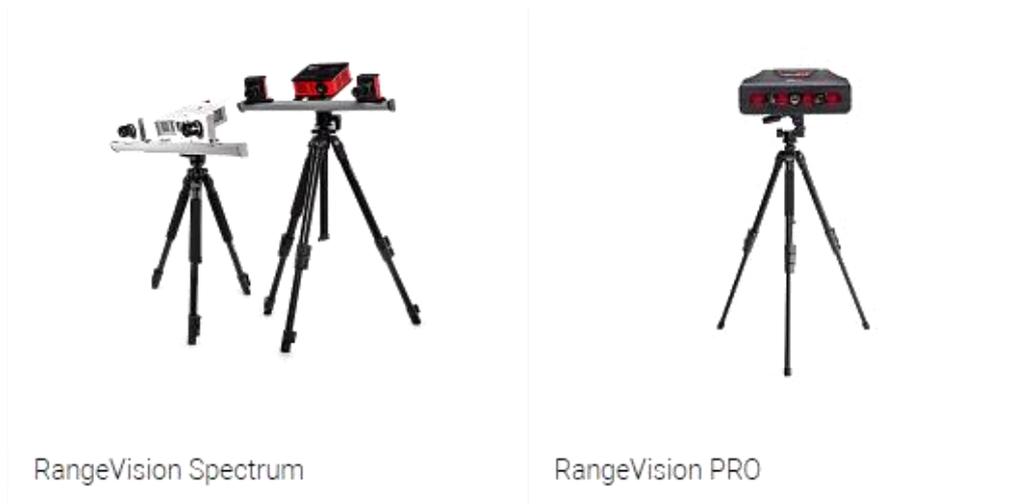


Рисунок 5.23 Стационарный 3D-сканер

Если габариты ваших деталей от 10 сантиметров до 12 метров – хорошим решением может послужить ручной 3D-сканер (Рисунок 5.23).

2. Контроль геометрии – Решение задач по оптическому неразрушающему контролю геометрии запчасти сразу после производства или в процессе эксплуатации. Сравнение скана с математической моделью, получение значений отклонений поверхностей или проверка заданных размеров и допусков на соответствие.

Основные критерии – точность, разрешение, удобство работы. Исторически данная область задач решалась стационарными 3D-сканерами (Рисунок 5.23) с технологией структурированного света, но было сложно контролировать детали больших габаритов. Сейчас появились мобильные ручные сканеры (Рисунок 5.24), которые позволяют контролировать детали с габаритами до 12 метров.



Рисунок 5.24 Ручной 3D-сканер

3. Визуализация– Решение задач по быстрой оцифровке существующих деталей для создания модели на экране. Позволяет добавить внешний вид вашего изделия на сайт, в презентацию, виртуальный тур\музей.

Основные критерии – простота работы, скорость работы и возможность сканирования в цвете. Для этой задачи подходят ручные 3D-сканеры с возможностью сканирования в цвете. Также можно использовать небольшие стационарные аппараты, это поможет сэкономить.

4. Архивирование - Возможность сохранения геометрии объекта для дальнейшего анализа при возникновении потребности.

Основные критерии – простота работы, скорость работы, точность. Задача может быть решена стационарными 3D-сканерами для деталей габаритами до 2 метров. Для работы с деталями больших габаритов мы рекомендуем ручные решения.

Основные критерии, по которым нужно выбирать 3D-сканер

Точность – это основной параметр любого профессионального 3D-сканера. Обычно под точностью сканирования понимают допустимое отклонение каждой точки полученной 3D-модели от физического образца. Измеряется в микронах (1 микрон = 0,001 мм).

Высокоточные 3D-сканеры (10-30 микрон). Обеспечивают максимальное качество получаемых данных. К этой группе относятся самые точные системы 3D-сканирования с минимальными погрешностями: некоторые модели 3D-сканеров корейской компании Solutionix и немецкой GOM.

3D-сканеры общего назначения (30-100 микрон). Самая большая группа 3D-сканеров, которые подходят для решения широкого круга задач в самых разных областях. Сюда относятся ручные устройства компаний Artec3D, ScanTech и Creaform, отечественные сканеры RangeVision.

3D-сканеры точностью меньше 100 микрон. Здесь представлены устройства, в работе которых не требуется ультра-точное считывание форм объектов. Например, это ландшафтные и архитектурные лазерные 3D-сканеры FARO. При оцифровке помещений или строительных объектов отклонение на 200-300 микрон допустимо и не критично.

Точность сканирования может быть улучшена с использованием системы фотограмметрии (Рисунок 5.25).



ScanTech MSCAN-L15 (релиз 2020 года)

Характеристики

Отрасли применения	Архитектура / Авиационно- Космическая отрасль / Автомобилестроение / Машиностроение / Нефтегазовая отрасль / Образование и исследования / Железнодорожная отрасль
Тип установки	Ручные
Технология	Фотограмметрия
Объемная точность	15 мкм/м
Наличие текстур	Нет



Рисунок 5.25 Система фотограмметрии

Разрешение – важный параметр. Он определяет каков минимальный размер элемента, который будет хорошо различим на нашем 3D-скане. Очень важно понимать, что значение разрешения может быть хуже, чем значение точности и это не линейно зависимые параметры. Обработка сканов с большим разрешением – трудоемкая и долгая задача. Поэтому многие устройства позволяют делать сканы с различным разрешением, за счет программного или аппаратного решения, чтобы оптимизировать значение данного параметра под вашу задачу.

Не стоит путать точность с детализацией (разрешением). Детализация - это степень дискретности, с которой 3D сканер позволяет оцифровать объект. Она выражается в минимальном шаге между измеренными точками (минимальный размер треугольника в полигональной модели) и определяется техническими параметрами 3D сканера (разрешение матрицы, область сканирования) и программными установками. Чем выше степень детализации, тем более мелкие элементы будут проявлены в полученной 3D модели. Высокая детализация важна при сканировании художественных изделий с мелким узором, деталей с маленькими элементами и т.п. При этом совершенно не обязательно, что сканер с высокой детализацией будет обладать высокой точностью, равно как и наоборот (Рисунок 5.26). Большое количество пикселей камеры совсем не означают качественную оптическую систему, профессиональные инструменты калибровки и профессиональные программные алгоритмы.

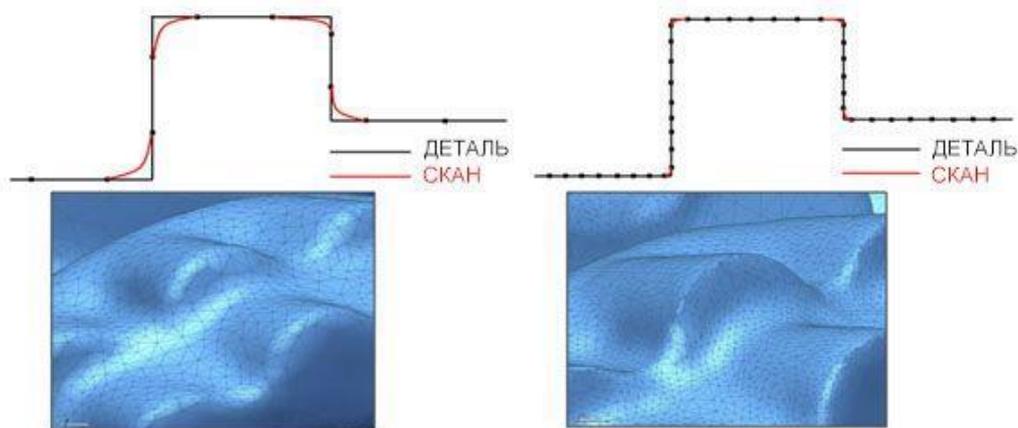


Рисунок 5.26 Результаты сканирования в зависимости от оптической системы сканера

Цена оборудования – сразу после основных технических характеристик идет экономическая. В зависимости от технических характеристик, простоты использования, удобства, известности бренда формируется цена устройства. Правильное понимание задач и условий работы оборудования помогут вам подобрать наиболее эффективное по цене решение.

Скорость сканирования – это комбинация скорости сбора данных, их передачи на компьютер и скорости работы алгоритмов обработки данных для получения финального результата. Необходимо, чтобы к сканеру прилагалось программное обеспечение, которое легко использовать. Сам процесс работы 3D-сканера это только начало, для получения финального результата обязательно потребуется обработка в программном обеспечении, поставляемом со сканером. Функциональность и удобство интерфейса программного обеспечения так же важны для общего показателя скорости сканирования.

Габариты сканируемой детали – параметр, определяющий удобство использования той или иной системы.

— Небольшие детализированные объекты (пресс-формы, детали устройств, ювелирные украшения и пр.). К оцифровке таких изделий обычно предъявляются высокие требования по точности измерений. Универсальный вариант для сканирования подобных предметов — 3D-сканер Artec Space Spider(справа). Для решения задач по технической оцифровке промышленных деталей и пресс-форм (когда требуется максимальная точность) подходят 3D-сканеры GOM.

— Объекты среднего размера (человек и части его тела, автомобиль, скульптура, большие детали и пр.). Предметы размером от футбольного мяча до легкового автомобиля не всегда удобно оцифровывать стационарным 3D-сканером. Поэтому для сканирования этой

категории объектов обычно используются ручные 3D-сканеры, которые позволят свободно перемещаться относительно объекта сканирования. Универсальным решением в этой области считается Artec Eva (слева на предпоследней картинке). Это устройство позволяет быстро (16 кадров/сек) считывать форму, цвет и текстуру объекта с точностью в 100 микрон.

— Большие объекты (здания, коммуникации, грузовые автомобили и пр.). Для сканирования масштабных объектов требуется, чтобы сканер считывал форму на больших расстояниях (0-300 метров). Поэтому для 3D-сканирования, например, фасадов зданий, помещений, рудников и шахт, нефтяных платформ и других подобных объектов используют лазерные 3D-сканеры. Они обеспечивают быстрое и точное (~1 мм) построение 3D-модели объектов на расстояниях от 0 до нескольких сотен метров.

Для деталей габаритами менее полуметра идеально подходят стационарные системы с поворотным столом. Для деталей габаритами до 8 метров – подходят ручные 3D-сканеры. Если необходимо сканировать детали с габаритами до 12 метров – можно использовать комплект ручной 3D-сканер + фотограмметрия. Для сканирования деталей с большими габаритами можно – так же использовать комплект стационарный 3D-сканер + фотограмметрия, но ручные решения более эффективны.

Как правило, сканеры могут сканировать объекты разных размеров, но, в любом случае, в том или ином диапазоне. Есть модели сканеров со сменными объективами, которые могут перенастраиваться на различные области сканирования и тем самым сканировать объекты сильно различающиеся по размеру. Например, 3D сканеры AICON SmartScan-HE и StereoScan благодаря широкому диапазону измерительных зон позволяют сканировать объекты от нескольких миллиметров до нескольких метров. В то же время сканеры Artec или серия PrimeScan от AICON имеют фиксированные конфигурации под относительно узкий размерный диапазон. В этом случае, если пользователю нужно сканировать объекты сильно отличающиеся по размеру, приходится использовать 2 или более отдельных сенсоров (Рисунок 5.27).

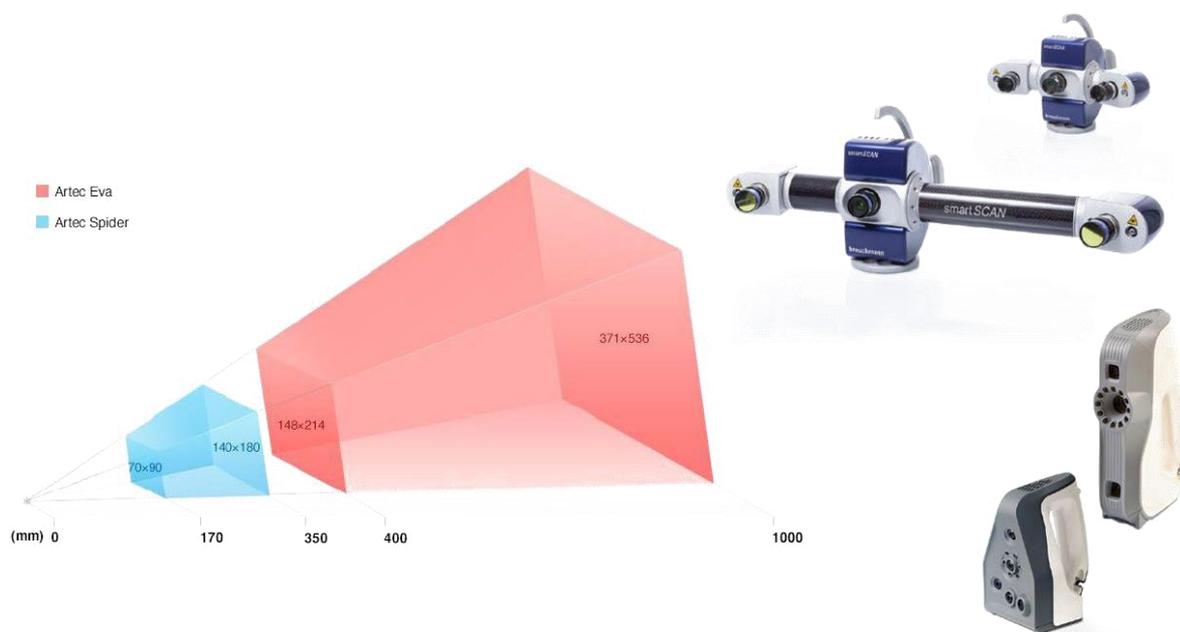


Рисунок 5.27 Отдельные 3D сканеры на разные диапазоны

Условия сканирования – очень важно при выборе измерительного оборудования понимать кто/где будет его использовать. Такие факторы как освещенность, влажность, температура, вибрации, запыленность влияют на работу разных систем по-разному. Некоторые сканеры предназначены для работы только в строго контролируемых условиях, тогда как другие специально спроектированы для работы в поле (в цеху). Определение места

и условий работы крайне важно для правильного подбора оборудования.

Поверхность объекта сканирования - для большинства 3D сканеров оцифровка блестящих или черных объектов является проблемой. Самый простой способ решить эту проблему - нанесение на поверхность белого матирующего слоя из баллончика. Данный метод позволяет не только с легкостью сканировать бликующие участки поверхности, но также справиться с зеркальными и прозрачными объектами. Однако, если нанесение на объект какого-либо покрытия недопустимо, а поверхность сложная, то это следует также учитывать при выборе 3D сканера. Как правило, сканеры с лазерной подсветкой значительно лучше справляются с черными и блестящими поверхностями. Некоторые модели сканеров, например, Leica HP-L-20.8, позволяют сканировать даже сильно блестящие поверхности благодаря технологии подстройки «на лету» в каждой отдельной точке.

Простота использования – технологии быстро развиваются и на рынке появляются все новые решения, это определяет необходимость поставщикам сканеров предлагать обучение ваших сотрудников работе с оборудованием. Однако даже после обучения, людям требуется время, чтобы привыкнуть к оборудованию, получить опыт для эффективной работы с ним. Простота программного обеспечения, простота использования самого сканера очень важны для пользователя и его адаптации к новому оборудованию.

Возможность сканирования цвета – для задач визуализации и дизайна очень важна не только форма, но и цвет объекта. Правильная цветопередача может являться решающим фактором при решении задач создания виртуального музея, магазина, презентации и рекламных роликов ваших продуктов.

Выбор 3D-сканера, исходя из сферы применения и решаемых задач.

Сканирование человека и частей его тела.

Создание компьютерной 3D-модели человека может понадобиться в самых разных сферах: медицина, дизайн, производство компьютерной графики и анимации, изготовление сувениров, разработка индивидуальных вещей и аксессуаров. Сканер для работы с человеком должен быть мобилен, прост и абсолютно безопасен.

Какие параметры 3D-сканера важны: безопасность, передача цвета, мобильность.

Лучший выбор для быстрого 3D-сканирования человека — цветные оптические 3D-сканеры Artec Eva (Рисунок 5.28).

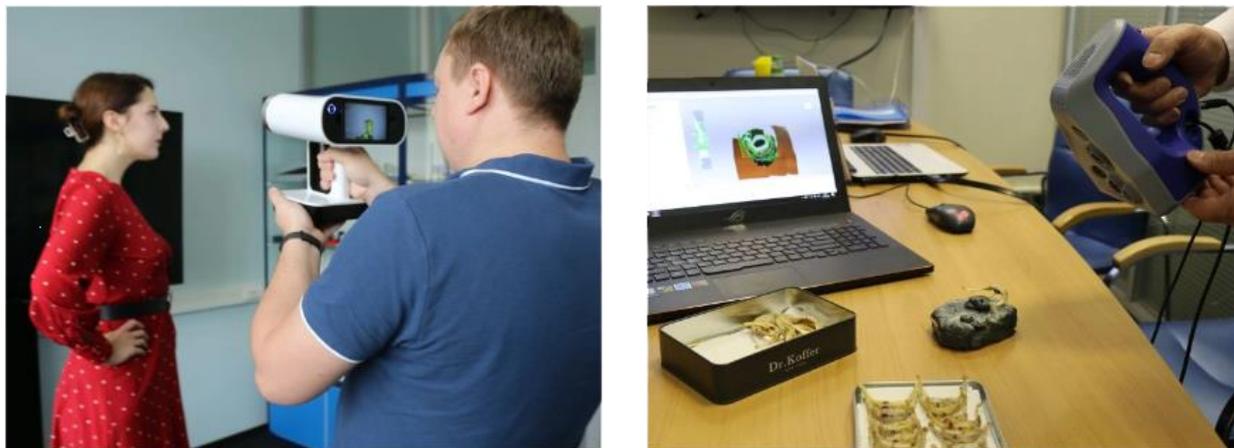


Рисунок 5.28 3D сканеры для сканирования человека

Промышленное производство

Сегодня с помощью 3D-сканеров решается самый широкий круг производственных задач. Объединяет их необходимость очень точного сбора данных, что предъявляет высокие требования к оборудованию.

Какие параметры 3D-сканера важны: высокая точность, стабильность результатов,

возможность работы с объектами различного размера.

Промышленные предприятия обычно используют высокоточные оптические 3D-сканеры компаний GOM. Эти устройства гарантируют высокую стабильность измерений и точность сканирования от 10 микрон. Обладают возможностью смены оптики для более качественной работы с объектами разного размера (Рисунок 5.29).



Рисунок 5.29 3D сканеры для промышленного производства

3D-сканеры для образовательных учреждений.

Университеты из разных регионов России — постоянные клиенты компании Globatek 3D. В университетах и школах с помощью 3D-сканеров реализуются самые разные проекты. Поэтому для использования в образовательных учреждениях обычно выбирают универсальные 3D-сканеры, простые и удобные в работе.

Какие параметры 3D-сканера важны: доступность, простота обращения, универсальность, мобильность (Рисунок 5.30).



Рисунок 5.30 3D сканеры для образовательных учреждений

Оказание услуг по 3D-сканированию

Для выполнения единичной задачи по 3D-сканированию объекта не обязательно покупать 3D-сканер. Поэтому с каждым днем все больше компаний обращается в специализированные центры, оказывающие услуги по 3D-печати и 3D-сканированию. Обычно для этого приобретают 3D-сканер, способный решать максимально широкий круг задач.

Какие параметры 3D-сканера важны: универсальность (выполнять разные заказы),

простота в работе (чтобы быстро обучить персонал), мобильность (выезжать на объект заказчика).

Оптимальным решением для оказания услуг по 3D-сканированию является комплект сканеров Artec Eva + Artec Space Spider. С их помощью вы сможете качественно оцифровывать широкий спектр объектов — от гайки до автомобиля (Рисунок 5.31).



Рисунок 5.31 3D сканеры для оказания услуг по 3D-сканированию

Контроль качества готовой продукции

3D-сканеры позволяют производить быстрый и точный бесконтактный контроль качества продукции. При этом важны два основных параметра: точность измерений и минимальное участие оператора в процессе. Оптимальное сочетание этих параметров демонстрирует модель Pro компании RangeVision (Рисунок 5.32).

Еще один способ контроля размеров (на этот раз – контактный) — использование координатно-измерительных машин FARO.

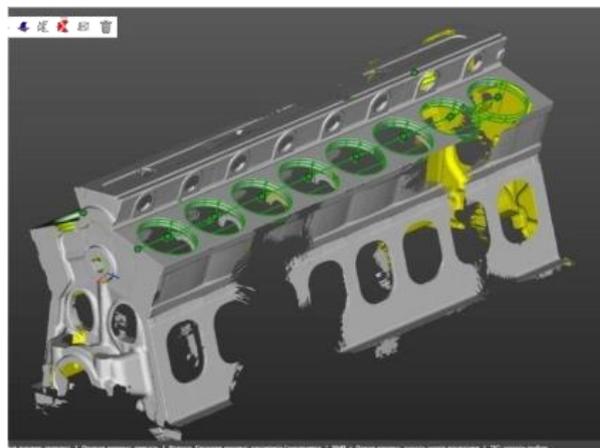


Рисунок 5.32 3D сканеры для контроль качества

Реверс-инжиниринг

В условиях импортозамещения технические решения для обратного проектирования пользуются стабильным интересом среди промышленных предприятий. 3D-сканеры сегодня играют важную роль в процессах точного снятия формы и размеров для составления производственной документации на готовые изделия.

Какие параметры 3D-сканера важны: высокая точность, современное программное обеспечение, позволяющее интегрировать результаты сканирования с САД-программами

(Рисунок 5.33).

Задачи по реверс-инжинирингу различаются по сферам производства, материалам, допускам технологий. Поэтому 3D-сканеры под задачи обратного проектирования подбираются индивидуально.

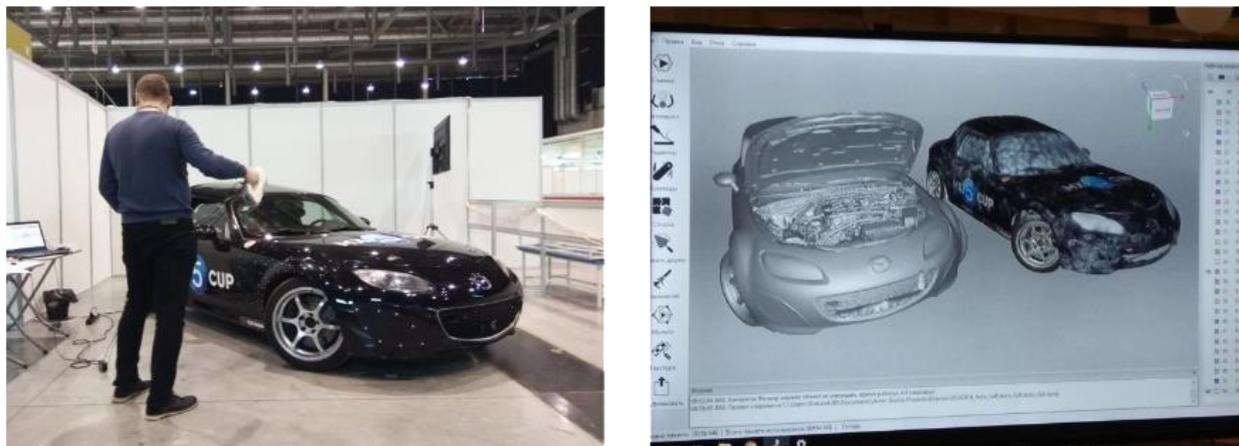


Рисунок 5.33 Совместимость 3D сканера и CAD-программы

5.4 Выбор технологии 3D моделирования

Архитектурные формы зданий изначально рождаются в воображении архитектора в виде гармоничных и прекрасных трехмерных образов [33-34]. История развития архитектуры доказывает, что авторы зданий всех исторических периодов превосходно владели средствами 3D моделирования, безупречно точно перенося монументальные идеи на плоскости чертежей. Просто невозможно возвести строение без понимания и виртуозного оперирования такими элементами трехмерного проектирования, как форма и объем, плоскости и разрезы. Создание 3D архитектурных моделей, пусть даже на примитивном уровне, требует знания основных свойств материалов и полного понимания строительных технологий.

Появление современного компьютера и программного графического комплекса позволяет создавать любые трехмерные модели в архитектурном проектировании. Такой инструментарий дает просто безграничное пространство для творчества архитекторов, дизайнеров, кинопродюсеров.

3D технологии стали для нас привычными. Мы пользуемся ими в повседневной жизни, мы любим развлечения на основе трехмерных симуляций, и мы уже начали обучаться в виртуальной трехмерной среде.

В каждой отрасли, в которую 3D-моделирование принесло свои изменения, имеются как свои определенные стандарты, так и негласные правила. Но даже внутри одной отрасли, количество программных пакетов бывает такое множество, что новичку бывает очень трудно разобраться и сориентироваться с чего начинать.

Сейчас совершенно невозможно даже представить современную архитектуру без трехмерного проектирования и визуализации самых разных объектов. Помимо традиционного применения, эти технологии уже сделали шаг в будущее – в области «3D печати» домов.

Все проекты должны иметь не только, двухмерные чертежи, разрезы, виды, но и полноценный раздел 3D моделирования фасадов и интерьеров.

Разрабатывая, скажем, фасады зданий в программах 3D, архитектор имеет возможность создать виртуальную модель и привязать ее к конкретному участку на местности. Все объекты создаются из выбранной фигуры, которая находится в составе набора примитивов

программы 3D моделирования. Библиотека примитивов настолько обширна, что вполне позволяет с помощью необходимого модификатора создавать любую модель реального мира.

Используя геодезические съемки, программа трехмерного проектирования в автоматическом режиме выводит на принтер чертежи генпланов и профили дорог и площадок с красными отметками. Это позволяет сократить сроки разработки и снизить ее себестоимость.

Современный трехмерный дизайн любого пространства позволяет сформировать полноценное представление о расстановке мебели, систем отопления, электропроводки, светильников, выключателей, вида остекления и заполнения проемов. Такой подход минимизирует ошибки в плане строительства, отделки и декорирования. Вы видите еще не построенное здание как на ладони, оно уже почти существует!

3D модели объектов растительного и животного реального мира создают как бы виртуальную реальность, где вы можете уже сейчас наслаждаться тем, насколько прекрасен будет ваш сад или насколько стильно будет выглядеть прилегающая территория вашего бизнеса. Определяя место физического объекта в 3D пространстве, можно запроектировать и весьма точно реализовать даже сложнейшие инновационные идеи в области строительства, декорирования, а также в ландшафтном дизайне.

Передовые, самые инновационные разработки в сфере 3D принтеров позволяют буквально печатать дома из цемента. Строительные 3D принтеры пока не совершенны и имеют довольно высокую стоимость, они чувствительны к перепадам погодных условий, требуют прямо-таки трепетного к себе отношения. Они не допускают перерывы в поставке бетонной смеси и не дружат с арматурным каркасом. Монтаж перемычек и перекрытий выполняется дополнительной техникой. Но дома по этой технологии возводятся в рекордно короткие сроки и могут иметь невероятно причудливый дизайн. Естественно, «напечатать» такой дом будущего совершенно нереально без предварительного проектирования в совместимой 3D программе.

Область применения 3D моделирования не ограничивается архитектурой, строительством и благоустройством.

3D-моделирование – это основа современного игрового и мультимедийного пространства.

Еще несколько лет назад трехмерный фантастический фильм был вершиной мастерства в киноиндустрии. Сейчас фильмы, мультфильмы и игры 3D превратились в нечто само собой разумеющееся. Создание трехмерных героев для кино и VR игр – это огромный прибыльный бизнес.

Трехмерные модели широко применяются в рекламе. Причем для их создания используют не только редакторы для моделирования, но и программу Adobe Photoshop.

Самое передовое направление в области VR и трехмерного моделирования пространства – это обучающие симуляции, позволяющие быстро и безопасно готовить специалистов в разных областях. Эту технологию внедряют даже для подготовки кондукторов, проверяющих билеты в автобусах!

Можно выделить 3 крупные отрасли, которые сегодня невозможно представить без применения трехмерных моделей. Это:

- Индустрия развлечений.
- Медицина (хирургия).
- Промышленность.

С первой мы сталкиваемся почти каждый день. Это фильмы, анимация и 90% компьютерных игр. Все виртуальные миры и персонажи созданы с помощью одного и того же принципа — **полигонального моделирования** (Рисунок 5.34).



Рисунок 5.34 Полигональное моделирование

Чем больше полигонов на площадь модели, тем точнее модель. Однако, это не значит, что если модель содержит мало полигонов (low poly), то это плохая модель. Тоже самое, нельзя сказать про то, что если в модели более 999999 полигонов (High poly), то это очень хорошо. Все зависит от предназначения. Если, к примеру, речь идет о массовых мультиплеерах, то представьте, каково будет компьютеру, когда нужно будет обработать 200 персонажей вокруг, если все они high poly? (Рисунок 5.35)

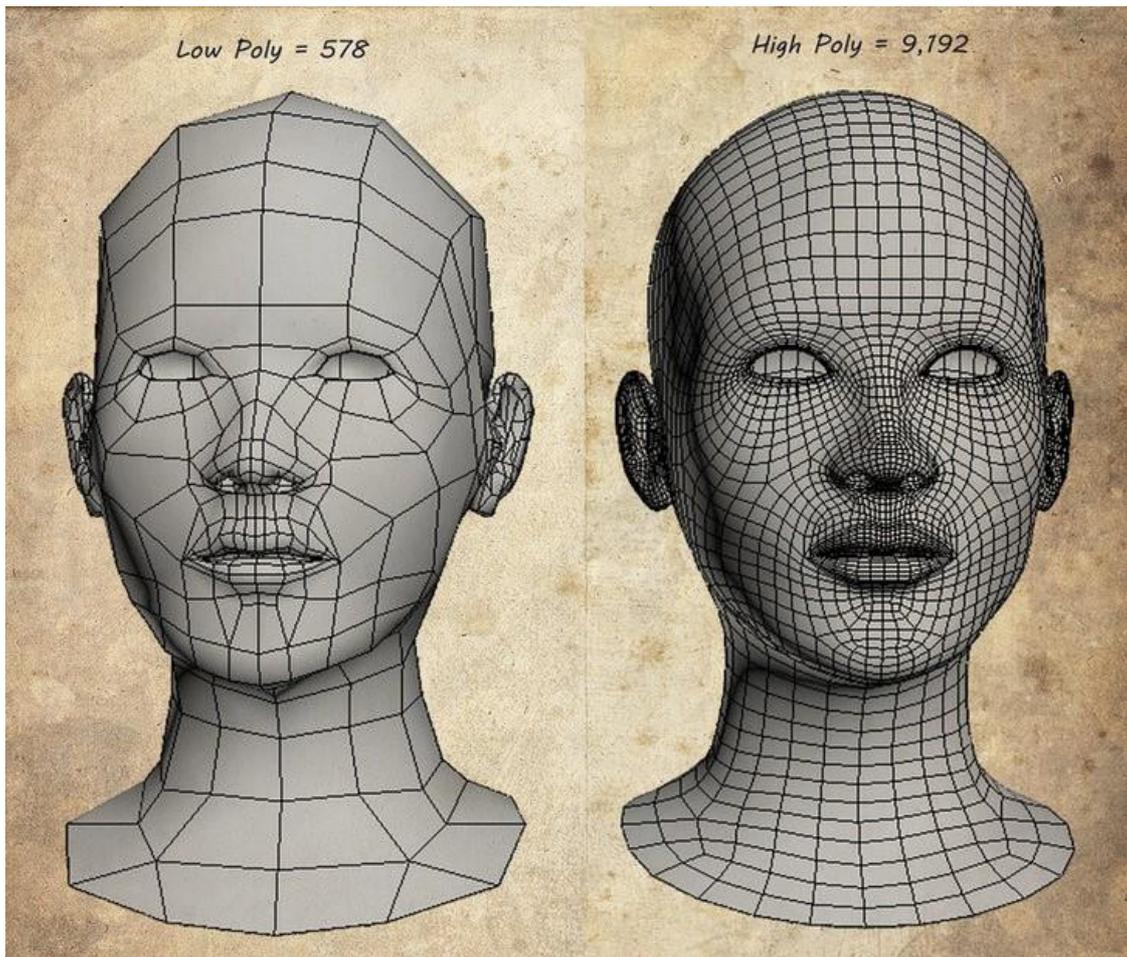


Рисунок 5.35 Влияние количества полигонов на конечную модель

Полигональное моделирование происходит путем манипуляций с полигонами в пространстве. Вытягивание, вращение, перемещение и т.д.

Пионером в этой отрасли является компания Autodesk (известная многим по своему продукту AutoCAD, но о нем позже).

Продукты Autodesk 3Ds Max, и Autodesk Maya, де-факто стали стандартом отрасли.

Что же мы получаем на выходе сделав такую модель? Мы получаем визуальный *образ*. Геймеры иногда говорят: «я проваливался под текстуры» в игре. На самом деле вы проваливаетесь сквозь полигоны, на которые наложены эти текстуры. И падение в бесконечность происходит как раз потому, что за образом ничего нет. В основном, полученные образы используются для *рендера* (финальная визуализация изображения), в игре / в фильме / для картинки на рабочем столе (Рисунок 5.36).

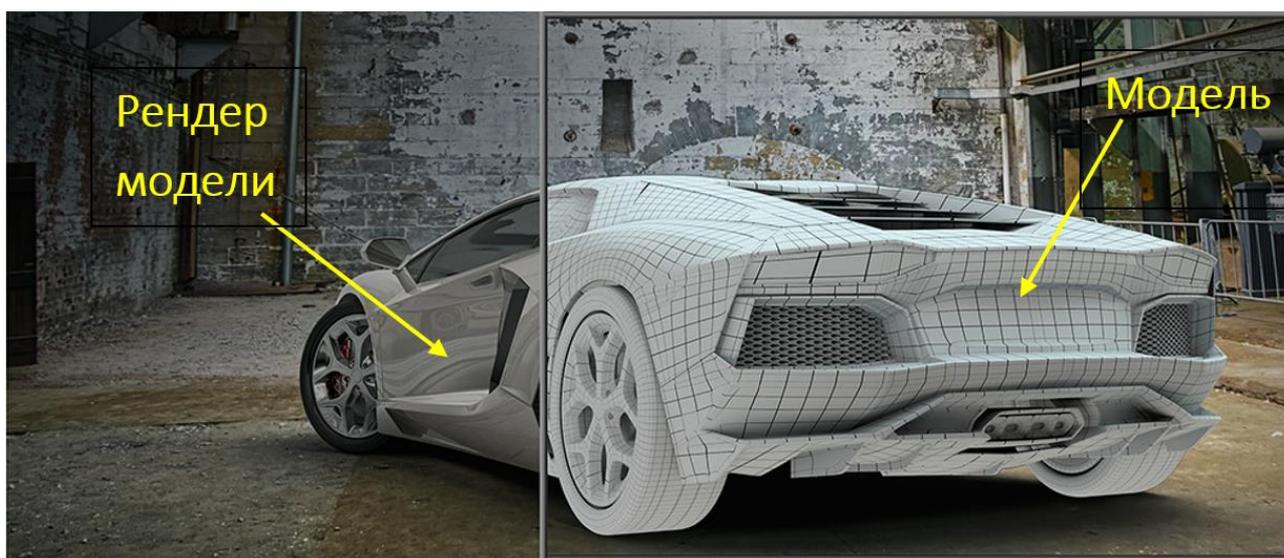


Рисунок 5.36 Рендер и модель

Есть такое направление как 3D-sculpting. По сути, тоже самое полигональное моделирование, но направленное на создание в основном сложных биологических организмов. В ней используются другие инструменты манипуляций с полигонами. Сам процесс больше напоминает чеканку или лепку, чем 3D моделинг.

Если полигональная модель выполнена в виде замкнутого объема, как например, те же скульптуры, то благодаря современной технологии 3D-печати (которая прожует почти любую форму) они могут быть воплощены в жизнь.

По сути, это единственный путь для полигональных 3D моделей оказаться в реальном мире. Из вышеописанного можно сделать вывод, что полигональное моделирование нужно исключительно для творческих людей (художников, дизайнеров, скульпторов). Но это не однозначно. Так, например, еще одной крупной сферой применения 3D моделей является медицина, а именно - хирургия. Можно вырастить протез кости взамен раздробленной.

Конечно, используя полигональное моделирование, можно построить все эти восстанавливающие и усиливающие элементы, но невозможно контролировать необходимые зазоры, сечения, учесть физические свойства материала и технологию изготовления (особенно плечевого сустава).

Для таких изделий применяются методы **промышленного моделирования** - САПР или по-английский CAD (Computer-Aided Design). Это принципиально другой тип моделирования. Чем этот метод отличается от полигонального? Тем, что тут нет никаких полигонов. Все формы являются цельными и строятся по принципу профиль + направление (Рисунок 5.37).

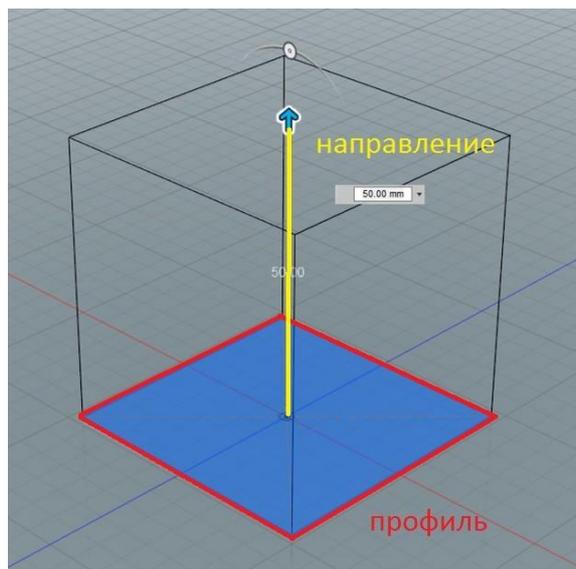


Рисунок 5.37 Формы в твердотельном моделировании

Базовым типом является **твердотельное моделирование**. Из названия можно понять, что, если мы разрежем тело, внутри оно не будет пустым. Твердотельное моделирование есть в любой CAD-системе. Оно отлично подходит для проектирования рам, шестеренок, двигателей, зданий, самолётов, автомобилей, да и всего, что получается путем промышленного производства. Но в нем (в отличие от полигонального моделирования) нельзя сделать модель пакета с продуктами из супермаркета, копию соседской собаки или скомканные вещи на стуле.

Цель этого метода — получить не только визуальный образ, но также измеримую и рабочую информацию о будущем изделии.

CAD – это точный инструмент и при работе с CAD, нужно предварительно в голове представлять топологию модели. Это алгоритм действий, который образует форму модели. Вот, как раз по топологии, можно отличить опытного специалиста от начинающего. Не всегда задуманную топологию и сложность формы можно реализовать в твердотельной модели, и тогда нам на помощь приходит неотъемлемая часть промышленного проектирования — **поверхностное моделирование** (Рисунок 5.38).

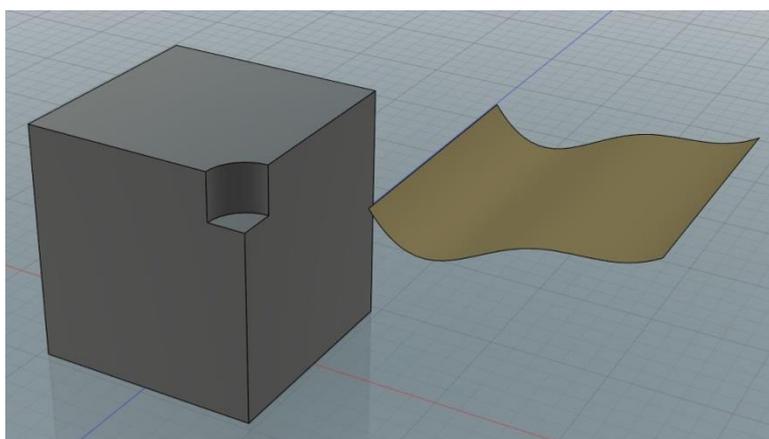


Рисунок 5.38 Поверхностное моделирование

Топология в поверхностях в 10 раз важнее, чем при твердотельном моделировании. Неверная топология – крах модели. Освоение топологии поверхностей на высоком уровне, закрывает 70% вопросов в промышленном моделировании. В конечном итоге, поверхности все равно замыкаются в твердотельную модель.

В САД мы получаем *электронно-геометрическую модель* изделия.

С нее можно:

- Сделать чертежи
- По ней можно написать программу для станков с ЧПУ,
- Ее можно параметризовать (это когда изменяя 1 параметр можно изменить модель без переделки)
- Можно проводить прочностные и другие расчеты.
- Ее так же можно послать на 3д печать (и качество будет лучше)
- Сделать рендер.

В составе САПР 3D-моделирование может производиться опционально.

Наиболее технологичным и часто применяемым программным комплексом для моделирования считается 3D Max Autodesk.

Графические редакторы этой компании (Maya, Autocad и Mutbox) не имеют конкурентов в 3D моделировании. Таких результатов Autodesk добился, проводя политику доступности программного комплекса для студентов. Компания-разработчик предусмотрела специальную трехгодичную лицензию для студентов, позволяющую полноценно освоить ПО и отточить навыки работы с ним. Естественно, программы 3D MAX являются мультилингвальными – поддерживают разные языки, в том числе и русский язык.

Как производится 3D моделирование для промышленных целей

Промышленное 3D моделирование выполняется всегда на основании технического задания (ТЗ) выданного заказчиком. Включая в задание раздел трехмерное моделирование, заказчик указывает степень детализации и количество вариантов с разными текстурами или цветом.

Осуществляя трехмерное моделирование объектов, проектировщик дает представление как об отдельных моделях деталей, так и о позиционировании и функционировании их в составе комплекса-изделия. 3D модели комплектующих, находясь в составе рабочего проекта, показывают итоговый вариант готового продукта (экстерьер или интерьер).

Проектированием инженерных систем в программах 3D моделирования решается задача автоматизации трудоемких процессов, например, таких, как создание рабочих чертежей линейно вытянутых объектов.

Средствами 3D-моделирования производится конструирование и тестирование деталей разнообразных устройств, механизмов, в том числе высокотехнологичных. Распечатав их на принтере в натуральную величину и оттестировав, конструкторы могут приступать к заводскому производству. Трехмерные технологии остро востребованы в автомобильной промышленности, где создаются 3D модели не только деталей, но и корпуса машин. Только так можно выпускать на рынок инновации и передовые решения – конструктивные и для целей автодизайна (Рисунок 5.39).

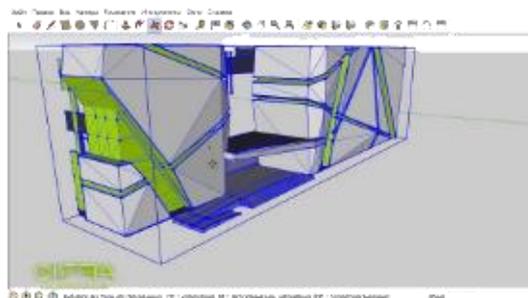
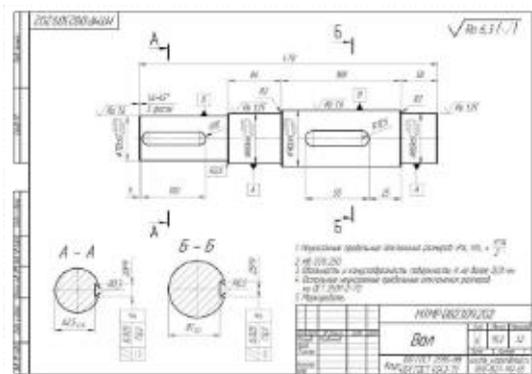


Рисунок 5.39 Трехмерные технологии в автомобильной промышленности

Этапы создания трехмерной модели

Фотореалистичность

3D проектировщик – это почти художник! В его работе необходим поиск фотореференсов и фиксация сцен естественной природы и окружения. Реалистичность сцен полезно сопоставлять с этими примерами. Образцы для моделирования и позиционирования выгодно подбирать еще до начала основных работ.

Кроме обеспечения натуральности, идентичности, поиск удачных примеров расширяет видение композиции и дарит вдохновение в работе!

Грамотный выбор необходимого программного обеспечения

Выбор технологии для 3D моделирования объектов реального или вымышленного мира зависит от используемого ПО. Разнообразие и специфичность программ для создания трехмерной модели, просто впечатляющее. Если требуется выполнить проект в 3D, соотнесите особенности выполнения и функционал программного обеспечения. Это поможет изначально сделать правильный выбор инструментария.

Например, если необходимо создать платье для модели человека, то в 3Ds так сложно выполнить развертку и наложить корректно текстуру на платье. Следовательно, это выполняется в программе, где инструменты 3D моделирования имеют такую возможность. Сложные проекты всегда выполняются с разделением труда на моделирование и визуализацию. Это связано с необходимостью иметь для этих работ большой объем специальных знаний и навыков. Заказанный проект должен быть выполнен качественно и в срок, поэтому крайне важно изначально работать с подходящим ПО.

Начинаем с 2D

Перед началом трехмерной разработки, как правило, выполняются детальные чертежи 2D. Например, этот этап обязателен перед моделированием в строительстве (Рисунок 5.40). Здания изначально проектируются в формате двухмерных чертежей с размерами, которые затем импортируются в программы, работающие с трехмерной графикой. Такой порядок подготовки позволяет избежать ошибок и неточностей, так как тот же 3Ds так лучше работает с готовыми полилиниями.

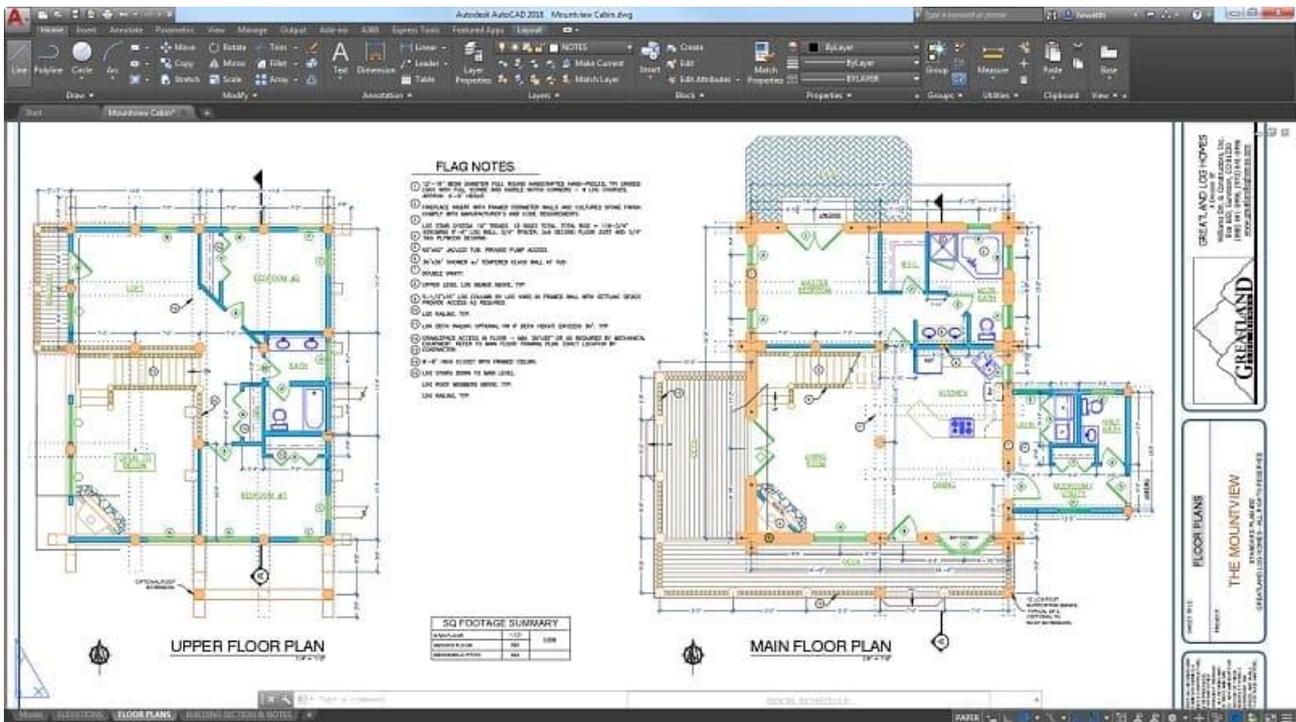


Рисунок 5.40 Моделирование в строительстве

Импортировав чертежи 2D в программу для 3D, проектировщик настраивает папку проекта и присваивает текущее название. В папке проекта будут сохраняться резервные копии файла, референсы, дополнительные библиотеки материалов с текстурами, текстуры новых создаваемых программой материалов и дополнительные сцены для проекта. Такой порядок учета файлов выполняют программы для визуализации 3D моделей и прописывают пути их определения на дисках компьютера. Изменение места нахождения текстур или других файлов проекта приводит к потере их для программы. Требуется дополнительное действие для прописи путей поиска и мест расположения текстур и файлов.

Создав папку проекта в 3Ds max, выполняем сохранение основного файла в папку сцен. Маршрутизация и классификация проекта на этом завершены! Можно переходить непосредственно к работе с 3D.

Простое 3D моделирование выполняется в четырех проекциях

Эти проекции составляют рабочую среду программного обеспечения для 3D моделирования. Для навигации разработан качественный интерфейс, позволяющий быстро и эффективно переключаться между проекциями и получать доступ к инструментарию программы.

Основой для работы можно считать примитивы. Примитивы – это комплекс простых форм (бюкс, сфера и т.д.). Набор примитивов в программе представляет собой некий конструктор для создания 3D моделей. Также есть необходимые модификаторы – инструменты для трансформации простых форм.

Используя простейшее, можно создать великое!

Для моделирования здания прямоугольной формы выбирается бюкс. Применяя модификаторы, можно выполнить оконные и дверные проемы в стенах. Работа с нужными простыми формами, а также их модификация, собственно, и есть создание трехмерных 3D моделей в необходимом количестве и качестве.

В современных программах заложено достаточное количество инструментов для продвинутого моделирования.

Одним из основных инструментов считается полигональное моделирование. Используя точки, ребра и полигоны выполняется модификация любого примитива и придание необходимой формы модели. Выполнять такие трансформации требуется с использованием определенного порядка действий. Для этого необходимы знания правил программы полигонального моделирования. После выполнения модификации проверяется расположение ребер — так называемая сетка с четырьмя точками у каждого полигона.

При моделировании с использованием нескольких примитивов (стены + пол + потолок) тщательно проверяются точки их соприкосновения. Расположенные рядом точки необходимо «сварить» специальной командой. Максимально приближая места стыка, добиваются точного касания полигонов. Так получается единая, монолитная модель, без каких-либо «щелей» и прочих дефектов.

Отлично помогает в работе с моделями временная изоляция объекта в пространстве программы.

Обучение полигональному моделированию, как правило, следует строго после изучения интерфейса. Это в прямом смысле базис, необходимый для успешного освоения 3D технологий. По сути, этот навык дает практически безграничную свободу. Это важно даже при наличии огромного количества готовых качественных моделей.

Выполнение рендера

Собрав сцену из моделей, ставится задача отчитаться перед заказчиком рендером. Если требуется первичное согласование, то выполняется черновой рендер, дающий наглядное представление о проделанной работе, концепции проекта. Для финальной отчетности и для презентационных целей выполняется фото реалистичный рендер.

Визуализатор устанавливает и настраивает камеру под заданный ракурс. Если визуализируется ландшафтный проект, то устанавливаются несколько камер (общий план с

птичьего полета или вид на входную группу). Особое внимание обращается на качественное освещение сцены.

Кроме освещения необходимо выбрать размер кадра финальной картинке. При необходимости вывода результата на печать задается размер бумаги (A1, A2, A3, A4) и размер фреймбуфера программы. Расчет необходимо выполнить сначала в сером цвете для постановки освещения. Если освещение сцены выполнено HDR картами и солнцем, то необходимо совместить их друг с другом для корректного падения теней. Самые простые в плане визуализации – это статические сцены (интерьер или экстерьер). Много времени занимает визуализация анимации различных сцен. Закончив просчет, выполняется сохранение и постобработка полученного результата.

Грамотный подход к моделированию, внимание к деталям и правильное ПО – залог, того что рендеры будут реалистичными и в соответствии с ТЗ заказчика.

Программное обеспечение

На сегодня разработано солидное многообразие программ для моделирования.

Для детализации их можно разделить на несколько групп, согласно тем задачам, на которые это ПО ориентировано:

- Максимально детальное отображение фактуры строительных материалов и конструкций 3D моделей зданий и сооружений (3Ds max Autodesk).
- Максимально детальное выполнение рабочих чертежей 3D моделей зданий и сооружений, в том числе с расчетами нагрузок и размеров (BIM Building Information Modeling в Autodesk Revit).
- Максимальная реалистичность моделей в киноиндустрии и играх (Maya Autodesk).
- Цифровой скульптинг (ZBrush, Mudbox).

Компьютеры делятся по назначению:

- Универсальные.
- Специальные.
- Для решения узкой задачи.

По мощности делятся:

- Супер ЭВМ.
- Большие.
- Малые.
- Микро ЭВМ.

Особое место в трехмерном моделировании занимает визуализация (получение реалистичной картинке) - рендер.

Процесс формирования визуализации называется рендер (англ. глагол render – представлять, отображать, англ. rendering —визуализация).

Для рендера используются вспомогательные программы. Часть из них являются штатными в 3D программах. Успеха в этом направлении добились также и сторонние производители рендер программ. Особую популярность имеет Chaos Group, которая имеет две самые прогрессивные программы для рендера VRay и CORONA.

Независимо от вида используемой программы и ЭВМ создание модели для постановки сцены используют раздел программы:

1. Моделирования с применением необходимых модификаторов.
2. Шейдинга для назначения материалов на готовые модели.
3. Визуализация.

Чтобы грамотно выбрать ПО, необходимо полноценное и квалифицированное понимание ТЗ и всех этапов трехмерного моделирования. Вам понадобится проанализировать софт с точки зрения специфики и функционала, чтобы на выходе получить высшее качество.

Например, чтобы эффективно выполнить чертежи, софт нужен такой: 3Ds max, AUTOCAD и Adobe Photoshop. Это ПО обеспечит качество моделирования, рендеринга и соблюдение сроков сдачи работы заказчику.

В программе Autodesk AUTOCAD чертится 2 D план объекта или здания в масштабе с указанием всех необходимых для 3D моделирования размеров. Иногда для аналогичных целей используются cad для 3D моделирования — типа Autodesk Revit или AUTOCAD 3D для архитекторов.

Когда выбрана программа для 3D моделирования, необходимо определиться с дополнительной программой для рендеринга. Это, как правило, дополнительный плагин (расширение), которое обязано полностью отвечать требованиям ТЗ по качеству визуализации и презентационным свойствам рендеров (Рисунок 5.41).

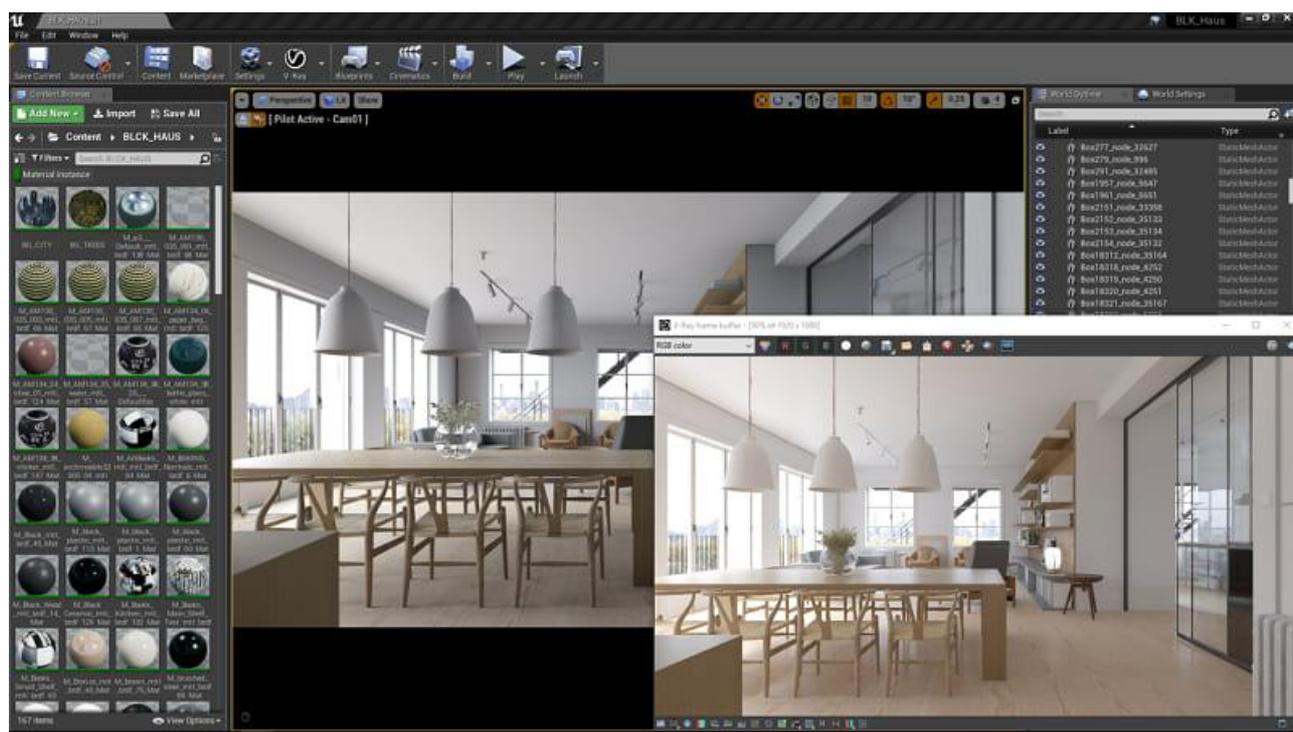


Рисунок 5.41 Рендер помещения

Существуют приложения, которые считаются лучшими для рендеринга: Iray, V-Ray, Arion, Octane, Corona, Mental ray и Arnold. Все они имеют широкий функционал и дружелюбный интерфейс, который дает возможность визуализатору успешно выполнить финальный расчет.

Технологии визуализации постоянно совершенствуются

В настоящее время Corona вместе с Chaos Group выпустила модель программы за номером 3. За это время в ее составе появилась своя камера и светильники. Усовершенствовалась система назначения материалов при помощи своих процедурных карт. Простота рендера в реальном времени позволила ПО от Corona стать самым популярным для начинающих визуализаторов. Особенно это проявилось после создание мощной библиотеки материалов в составе самой программы. Слабым местом программ Corona – Chaos считается процесс преобразования сцен, созданных в V-Ray, в Corona и обратно. Из-за дефектов данного импорта-экспорта часто требуется корректировка материалов и освещения.

V-Ray от Chaos Group также серьезно продвинулся в плане развития рендеринга. Поделившись своими наработками с Corona Render, Chaos Group выпустила V-Ray 5 и сразу вернула себе лидерство на рынке программ для визуализации. Созданные ранее библиотеки моделей для V-Ray разных версий (начиная от 1.5 до 3.3) за десятилетия существования

трехмерного моделирования корректны до настоящего времени. Сложные проекты визуализации выполняются только с материалами V-Ray Chaos Group. Основной причиной появления новых визуализаторов считается моральное устаревание материалов и рендера, созданного в составе основной программы.

Создатели 3Ds max также предусмотрели собственные библиотеки материалов (Autodesk). Существует довольно прогрессивный порядок присвоения (назначения) конкретного материала той или иной модели – эта технология стала новым витком развития уже имеющейся.

Начиная с 1997 года, появляется в продаже редактор трехмерной графики 3D Studio Max 2 имеющий в составе все современные блоки интерфейса.

Autodesk ежегодно выпускает новую версию программы в двух вариантах— 3Ds Max и 3Ds Max Design. Первый вариант предназначен для специалистов в области моделирования. Второй вариант программы используется дизайнерами и архитекторами.

Все это разнообразие инструментов и технологий в сфере 3D моделирования и проектирования, дает огромные возможности специалистам из разных областей! Освоение трехмерной графики двигает вперед целые промышленные направления, а также делает нашу жизнь динамичнее, интереснее. Мы уверены, что будущее 3D моделирования почти не имеет горизонтов и пределов, что эти передовые технологии скоро станут еще более доступными, востребованными и незаменимыми.

ГЛАВА 6. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ 3D ТЕХНОЛОГИЙ

6.1 Программное обеспечение для 3D печати

6.1.1. Редактирование и ремонт STL-файлов

MeshLab - Система обработки неструктурированных 3D моделей.

Трехмерное программное обеспечение для обработки сетки. Это система общего назначения с открытым исходным кодом, направленная на обработку типичных не таких маленьких неструктурированных 3D моделей [35].

MeshLab ориентирован на управление и обработку больших неструктурированных сеток и предоставляет набор инструментов для редактирования, чистки, исцеления, проверки, визуализации и преобразования этих видов сеток.

MeshLab разработан ISTI - научно-исследовательский центр CNR; первоначально MeshLab создавался как курсовое задание в университете Пизы в конце 2005.

MeshLab – это целостная система, имеющая в своем распоряжении функции, предназначенные для обработки и изменения 3D моделей, в основном неструктурированных (Рисунок 6.1).

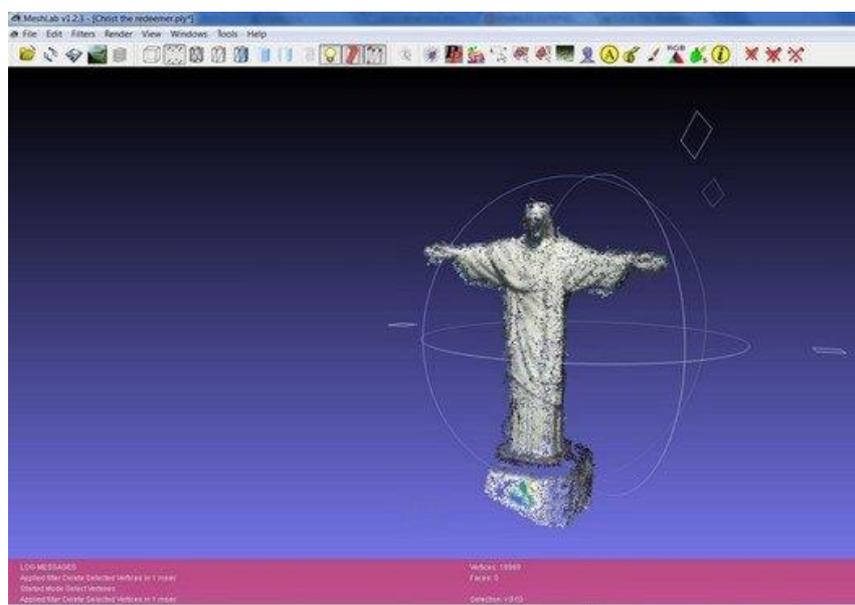


Рисунок 6.1 Интерфейс MeshLab

Программа бесплатная и предназначена в первую очередь для обработки моделей, получаемых после операции трехмерного сканирования.

В своем распоряжении MeshLab имеет обширный инструментарий, позволяющий очищать, редактировать, восстанавливать, визуализировать и конвертировать 3D модели. Программа полностью совместима с Windows 7, Mac OS и Linux.

Над всеми пользовательскими и загруженными работами можно проводить различные действия: очищать выбранные элементы, исправлять недочеты, проверять на корректность и даже конвертировать в другой формат.

Интерактивные возможности работы с MeshLab:

- Интерактивный выбор и удаление элементов модели. Применимо даже к большим объектам;
- Интерактивное рисование с возможностью выбора, сглаживания и окраски объекта.

Работа со многими форматами на входе и выходе:

- Импорт: .PLY, .STL, .OFF, .OBJ, .3DS, COLLADA, .PTX, .V3D, .PTS, .APTS, .XYZ, .GTS, .TRI, .ASC, .X3D, .X3DV, .VRML, .ALN;
- Экспорт: .PLY, .STL, .OFF, .OBJ, .3DS, COLLADA, .VRML, .DXF, .GTS, .U3D, .IDTF, .X3D.

Фильтры очистки модели:

- Удаление дублированных, повторяющихся, не имеющих ссылки вершин и пустых точек;
- Удаление небольших изолированных участков;
- Последовательное объединение;
- Автоматическое заполнение отверстий и дыр;
- Поверхностная реконструкция по точкам;
- Подразделение поверхностей на слои;
- Сохранение особенностей сглаживания и всех фильтров;
- Различные цветовые фильтры;
- Возможность обозначения границ;
- Интерактивное рисование объектов;

Другие возможности программы:

- Цветная живопись;
- Возможность выбирать инструмент и цвет для рисования;
- Наличие многоступенчатого сглаживания;
- Рендеринг, базирующийся на OpenGL Shader, совместимый с проектировщиком Turphoon Lab Shader;
- Возможность крупного рендеринга (до 16kx16k) для высококачественной печати;
- История всех совершенных действий и примененных фильтров может быть использована на другие модели и проекты или же сохранена в памяти для дальнейшего использования;
- Расширенные плагины, базирующиеся на архитектуре рисования объектов с новыми процессами обработки и кастомизации, поддержка работы с новыми форматами.

Довольно популярной проблемой при работе с 3D моделями является возникновение отверстий (holes, gaps). Такие проблемы возникают из-за несовершенной процедуры реконструкции сцены или недостаточной точности и качества 3D камер типа Microsoft Kinect (Рисунок 6.2).



Рисунок 6.2 Пример модели с отверстием

Мы можем восстановить поврежденные поверхности моделей и закрыть дыры в программе Meshlab. Meshlab включает специальный фильтр для задачи закрытия отверстий в 3D моделях.

Больше информации и скачать Meshlab - <https://www.meshlab.net>

Autodesk MeshMixer - одно из самых популярных ПО для подготовки mesh файлов (формирования сетки) .stl и .obj.

Autodesk MeshMixer — профессиональное программное обеспечение от известной компании, основная функциональность которой сосредоточена на дополнительной настройке уже имеющейся 3D-модели для дальнейшей печати на соответствующем оборудовании [36]. Главная особенность софта — создание поддержек, которыми являются дополнительные опоры фигуры для комфортной печати определенных деталей (Рисунок 6.3). Гибкость настройки и универсальность достигается за счет огромного количества встроенных инструментов и функций.

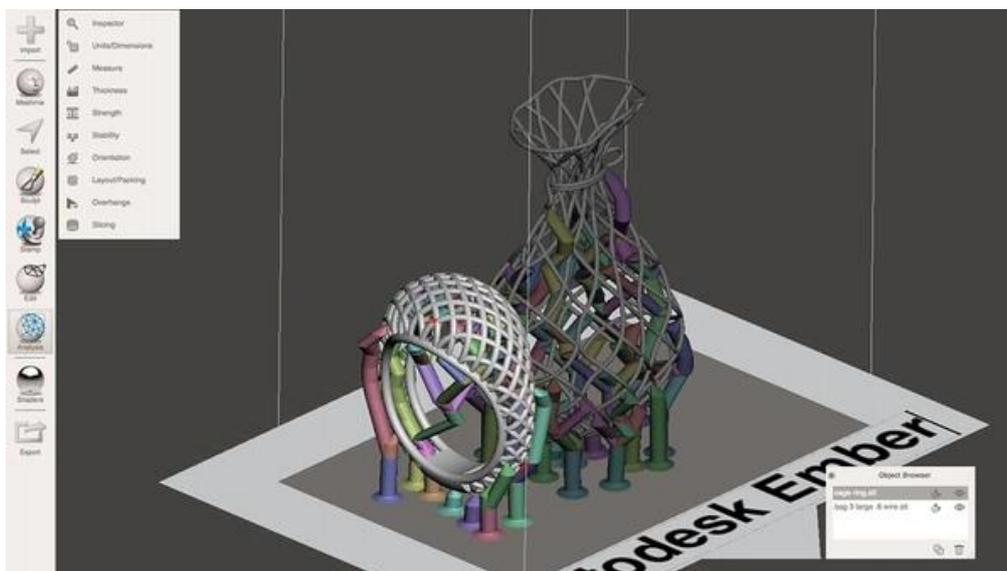


Рисунок 6.3 Генерация поддержек в Autodesk MeshMixer

Функции и возможности.

Главное — разобраться в функциональных особенностях Autodesk MeshMixer, чтобы знать, в каких ситуациях может потребоваться помощь этого софта, и насколько качественной она будет. Необходимо отметить такие важные моменты:

1. Быстрое перемещение объектов. Данный софт поддерживает опцию Drag-and-Drop, которая позволяет просто выбрать необходимый файл, переместить его на рабочее пространство и сразу же начать взаимодействие.
2. 3D-скульптурирование. Иногда к Autodesk MeshMixer потребуется обратиться, чтобы добавить или изменить детали проекта, тогда в этом помогут инструменты, предназначенные для скульптурирования.
3. Набор шаблонов. Дополнительно может потребоваться добавление сеток и других стандартных объектов, присутствующих на трехмерных моделях. В этом случае можно воспользоваться набором заготовок, присутствующих в программе.
4. Генерация поддерживающих структур — та самая опция, ради которой многие и загружают рассматриваемый софт. Строение поддержек происходит автоматически, а юзеру остается только настроить основные параметры, чтобы ориентация была выбрана правильно, а также при дальнейшей генерации не возникло конфликтов или сбоев.

5. Дополнительные функции. В Autodesk MeshMixer присутствует еще множество незначительных инструментов, которые тоже часто оказываются полезными. Сюда можно отнести автоматическую заливку отверстий, зеркалирование, точное позиционирование, автоматические опции для расчета устойчивости и толщины объектов.

Преимущества и недостатки.

Если вы рассматриваете Autodesk MeshMixer в качестве основной программы для работы и желаете загрузить ее, сначала предлагаем ознакомиться с ее недостатками и преимуществами, чтобы собрать общую картину об этом решении. Начнем с достоинств:

- Бесплатное распространение (скачать можно по ссылке - <https://meshmixer.com/download.html>).
- Отличная реализация автоматического создания поддерживаемых структур.
- Поддержка шаблонов и предметов, которые будут использоваться часто.
- Совместимость со всеми необходимыми форматами файлов.

Недостатки:

- Непродуманные функции для полноценного скульптинга.
- Появление периодических зависаний и вылетов, что особенно актуально для слабых компьютеров.
- Отсутствие русского языка.

Как поставить русификатор для Autodesk MeshMixer.

К сожалению, разработчики рассматриваемого софта пока не добавили в него русский язык, однако ситуация может поменяться в будущем. Сейчас пользователям предлагается задействовать переводы от энтузиастов, которые не всегда функционируют правильно, а также под их видом могут распространяться вирусы. Однако, если вы уверены в том, что скачиваете подходящие и безопасные файлы, их необходимо вставить по пути: C:\Program Files\Autodesk\Meshmixer\resources\stringTable с заменой текущих объектов, а затем в самой программе поменять язык на необходимый.

Пример русификатора по ссылке - <https://3dtoday.ru/blogs/hurricane1939/meshmixer-i-russkiy-yazyk-pervaya-popytka>

Autodesk Netfabb – ремонт и подготовка моделей к печати.

Netfabb от Autodesk — это программное обеспечение для организаций, которые используют 3D печать в своих бизнес процессах и создают изделия уникальными свойствами, возможными только при аддитивном производстве [37].

Популярный среди инженеров в аэрокосмической, тяжелой промышленности, автомобилестроении и здравоохранении, Netfabb предлагает набор инструментов для оптимизации повседневной работы. Функции программного обеспечения для анализа файлов деталей и моделирования предназначены для того, чтобы ваши детали и компоненты не только печатались точно так, как ожидалось, но и работали соответствующим образом.

С января 2021 года Autodesk добавила инструменты Netfabb в семейство решений Autodesk Fusion 360. Подписчики Netfabb по-прежнему будут иметь доступ к своим продуктам Netfabb, но теперь они также получают дополнительные преимущества Fusion 360 и всех его возможностей, поддерживающих моделирование, производство, документирование и многое другое. Для многих пользователей Netfabb это новое предложение предоставляет расширения Additive Build Extension и Additive Simulation Extension для Fusion 360 без дополнительной оплаты. Кроме того, пользователи Netfabb получают доступ к Fusion 360 Team и HSMWorks.

Основное внимание в обновлении 2022 года, выпущенном 7 октября, было направлено на усиление интеграции с 3D-принтерами, которые теперь включают EOS, Mimaki, Stratasys Origin One, Aconity 3D, ExOne X1 160 Pro и другие, что упрощает подготовку ваших заданий на 3D печать.

Оптимизация конструкции для аддитивного производства.

Поскольку аддитивное производство позволяет производить детали с уникальными характеристиками, такими как внутренние решетчатые структуры и сложная геометрия, которые невозможны при любом другом типе производства, Netfabb дает инженерам возможность полностью переосмыслить конструкцию детали.

Однако многие изделия сегодня не изготавливаются методом 3D-печати, в основном это литье, ковка или обработки на станках с ЧПУ. Но цифровые файлы, традиционных методов, отлично печатаются в 3D принтерах, но вы не получите максимальную отдачу от своей детали или не доведете ее до наивысшего потенциала, если она не включает в себя уникальные функции. Netfabb позволяет вам брать существующие цифровые файлы и переделывать их для аддитивного производства с помощью надежного меню функций автоматической оптимизации и ручных инструментов.

Например, вы можете сделать детали полыми, чтобы значительно уменьшить вес, тогда как литье под давление не предлагает такой возможности. Вы можете объединить в одну сборку, детали, которые при обработке с ЧПУ должны были изготавливаться по отдельности. Вы можете добавить текстуру поверхности, например логотипы, когда в традиционных методах производства они должны наноситься на отдельном этапе, после изготовления.

Netfabb может обработать ваш цифровой файл детали и создать его новые версии, оптимизированные по жесткости и весу, в зависимости от нагрузок и ограничений. Задача состоит в том, чтобы сохранить конструктивные характеристики при уменьшении веса детали с учетом ограничений 3D печати. Утилита оптимизации Netfabb используется для улучшения конструкции с использованием двух разных подходов, — оптимизация решетки и оптимизация топологии (самостоятельно создает форму детали под заданные условия функционирования). Optimization Utility поддерживает интеграцию с Autodesk Nastran FEA, который представляет собой инструмент анализа методом конечных элементов, используемый для анализа линейных и нелинейных напряжений, динамики и характеристик теплопередачи конструкций и механических компонентов.

Для интегрированного анализа производительности, другими словами, чтобы проверить, как оптимизированная конструкция будет работать в определенных условиях, Netfabb включает встроенный инструмент моделирования Autodesk Nastran.

Исправление ошибок 3D файлов и подготовка к печати (Рисунок 6.4).

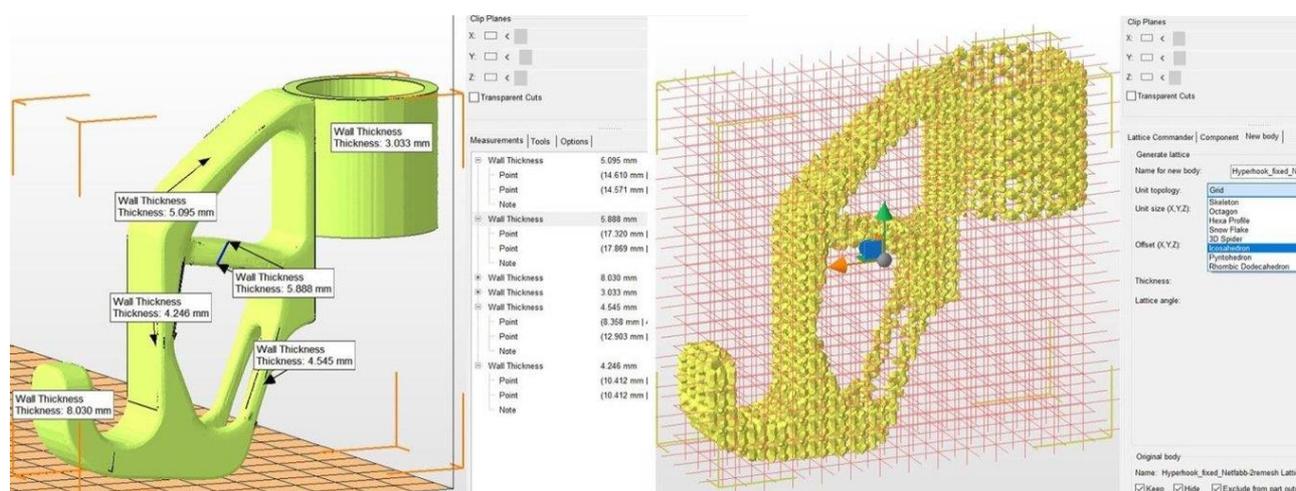


Рисунок 6.4 Netfabb выявляет проблемы в сетке модели, которые могут привести к проблемам во время 3D печати

Netfabb отличается от обычных программы для исправления файлов STL файлов, его способность импортировать данные практически из любой САПР/CAD (Solidworks, NX,

Inventor и другие) и быстро анализировать детали на пригодность к 3D печати, время печати, предполагаемый расход материалов и возможная стоимость в зависимости от того, какой именно тип принтера используется.

Если обнаружены ошибки, Netfabb предлагает меню вариантов исправления. Вы можете увидеть негативные отзывы о Netfabb в Интернете, основанные на том, что пользователи не хотят платить 30 долларов в месяц за средство для исправления файлов и они могут быть правы, но Netfabb — это гораздо больше, чем средство для исправления файлов, говоря об исправлении файлов, давайте посмотрим, как это делает Netfabb.

В 3D-модели могут быть ошибки, которые часто не представляют большой проблемы, например, если файл отправляется на фрезерный станок с ЧПУ, но могут помешать его правильной печати на 3D-принтере. Цифровой файл может иметь пустоты в сетке, несвязанные границы и ошибки в ориентации, среди прочих проблем. Ваш файл также может нуждаться в восстановлении для печати с использованием определенной технологии (FDM, SLS и т. д.) и на определенных принтерах (HP, Stratasys, Formlabs и т. д.).

Netfabb принимает все это во внимание и анализирует цифровые файлы на наличие всех распространенных ошибок, предоставляя вам возможность разрешить программе автоматически исправлять проблемы или сделать это вручную. Вы можете сэкономить время, создав сценарии для применения пользовательских исправлений к общим проблемам, обнаруженным в ваших файлах, исправления сотен деталей одновременно и настройки сетки для более детальной печати.

Возможности 3D моделирования в Netfabb (Рисунок 6.5).

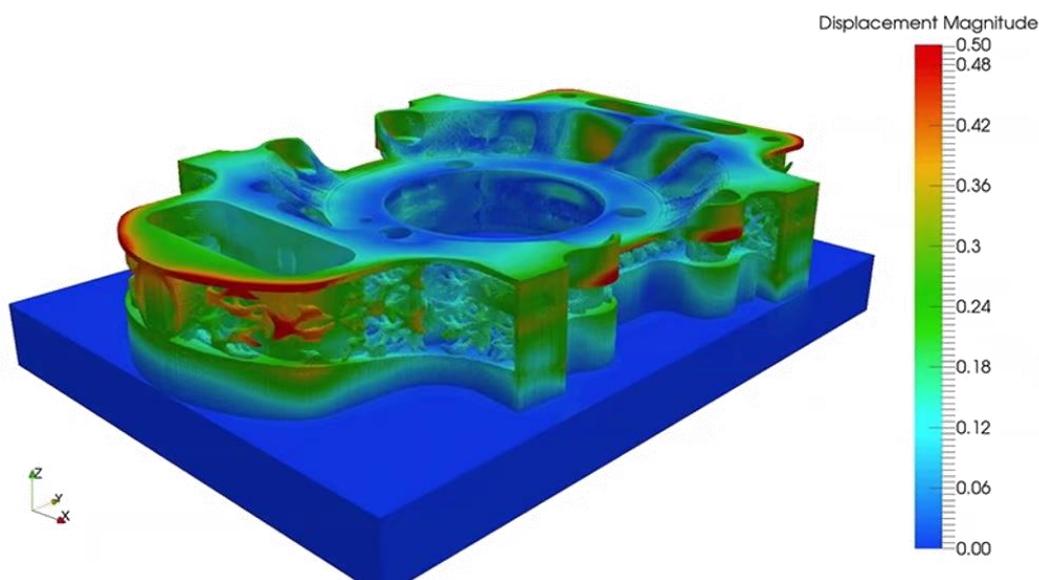


Рисунок 6.5 Отчет об анализе Netfabb

Инструмент Netfabb Simulation — это дополнительный компонент, предназначенный для повышения надежности, предсказуемости и воспроизводимости деталей. Netfabb Ultimate имеет ограниченные встроенные возможности моделирования.

Возможности Netfabb Simulation включают следующие функции:

- прогнозировать реакцию деталей на тепло и механическое воздействие, чтобы уменьшить количество брака при сборке и тестировании
- создавать файлы PRM на основе выбранного материала и параметров процесса для повышения точности
- возможность моделировать процесс 3D печати сплавления в порошковом слое, что поможет определить потенциальные причины брака

- зафиксировать взаимодействие между моделью и неровностями стола 3D принтера
 - выявить возможные сбои при печати, которые могут привести к повреждению оборудования
 - оптимизировать расположение опорных конструкций
 - предсказать, как будут деформироваться металлические детали, изготовленные методом аддитивного производства
 - компенсировать искажения для достижения желаемой формы после 3D печати
- Опорные конструкции Netfabb (Рисунок 6.6).*

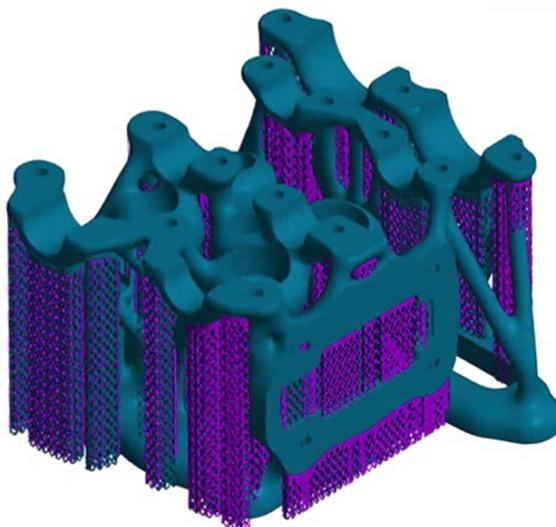


Рисунок 6.6 Поддержки в Netfabb

Модуль опорные конструкции Netfabb доступен на уровнях подписки Premium и выше, хотя некоторые функции доступны и в стандартной и бесплатной версиях. Модуль предоставляет интерфейс для анализа потребностей в подержках для ваших деталей, создания и редактирования, а также просмотра результатов.

Netfabb обеспечивает гибкое применение опор. Вы так же, можете выбрать автоматическое формирование поддерживающих конструкций. Netfabb по умолчанию обрабатывает параметрические опоры, окрашивая их в фиолетовый цвет. Как только ваш файл детали оптимизирован и добавлены опоры, он почти готов для 3D печати.

Netfabb позволяет упаковывать детали по оптимальной форме в объем области сборки 3D принтера, чтобы максимально использовать пространство и печатать как можно больше деталей одновременно, сокращая время и используемые материалы. Обновление 2021 года включает в себя два новых 3D упаковщика: один основан на моделировании движения деталей под действием силы тяжести, а другой сортирует по размеру и сначала упаковывает крупные детали, а затем средние и мелкие детали, чтобы лучше использовать доступное пространство.

Цена и системные требования.

Netfabb доступен в виде бесплатной 30-дневной пробной версии, а затем в трех версиях: Standard, Premium и Ultimate. Netfabb Simulation является дополнительной утилитой и ее цена не публикуется. У Netfabb есть бесплатное, но ограниченное по времени предложение для студентов и преподавателей.

По состоянию на январь 2021 года Netfabb включает Fusion 360, поэтому, если у вас есть подписка на Fusion 360, у вас есть доступ ко многим, но не ко всем функциям Netfabb.

Fusion 360 с программным обеспечением Netfabb, доступным в версиях Premium или Ultimate, а также Netfabb Local Simulation, включает в себя эффективные возможности

подготовки сборки, а также инструменты для оптимизации проектов и моделирования процессов аддитивного производства металлов.

Netfabb Standard теперь называется «Fusion 360 with Netfabb Standard». Это предложение доступно только при продлении для существующих клиентов. Цена 240 долларов в год.

Для студентов вузов имеется бесплатный доступ на 3 года.

6.1.2. Программы слайсинга - разделения модели на слои для 3D печати

Принтер для печати 3D-моделей получает команды из файла, в котором записан особый код. Для создания таких файлов необходимо особое программное обеспечение — приложения-слайсеры[37].

Слайсер — это компьютерная программа, подготавливающая для 3D-принтера цифровую модель объекта для печати. Технология создания объемной фигуры подразумевает ее послойный набор. Приложение-слайсер нарезает ее на слои заданной толщины, и печатающее устройство, считывая закодированную информацию, создает нужный объект.

От работы слайсера конечный результат печати зависит едва ли не в большей степени, чем от возможностей самого принтера.

Структура слайсеров

Интерфейс всех слайсеров разбит на блоки-разделы настроек. Основных блоков шесть:

1. Настройки самой программы, не оказывающие влияния на параметры печати:
 - выбор локализации — языка, единиц измерения;
 - включение/выключение расширенных функций;
 - цветовое оформление, параметры отображения;
 - информационные вкладки.
2. Подключение принтера:
 - выбор марки и модели;
 - управление действиями экструдера, установка скорости и температуры, указание количества печатающих головок.
3. Выбор филамента, указание вида материала и его характеристик.
4. Работа с моделью:
 - позиционирование;
 - масштабирование;
 - модификация;
 - анализ.
5. Параметры слайсинга — порядка послойного формирования объемного объекта из цифровой модели. Здесь же настраиваются сервисные конструкции: поддержки, стенки и прочие вспомогательные элементы.
6. Дополнительные установки: скрипты, плагины и макросы, содержащие заранее разработанную последовательность команд — включение паузы для смены филамента, холостые передвижения по осям, остановку и возобновление печати в нужное время на указанном слое и прочие.

Каждый разработчик пишет программу на основе этой структуры, формирует ссылки и взаимосвязи параметров.

Для нарезки моделей разработано множество программных продуктов. Некоторые работают только с определенной маркой 3D-устройств, но большинство являются универсальными и подходят для любого принтера.

Simplify3D

Профессиональная программа для работы с 3D-устройствами разных производителей.

Плюсы:

- широкий список марок и моделей принтеров для подключения;
- конечный результат отличается качеством;
- стандартные и расширенные настройки, большой выбор инструментов и опций;
- дает возможность сформировать собственный шаблон;
- высокая скорость нарезки;
- поддержка нескольких экструдеров;
- онлайн-поддержка для пользователей, видеоуроки и мануалы в открытом доступе.

Минусы:

- для настройки принтера по марке требуется доступ в интернет и оплаченная лицензия;
- не русифицирован;
- высокая цена.

Разработчики не предусмотрели триал-версию для ознакомления, но гарантируют возврат средств в течение двух недель.

Simplify3D — мощный софт для печати моделей любой сложности. Устанавливается не только на ПК и ноутбуки, но и на планшеты, но с урезанным функционалом.

Ultimaker Cura — универсальная программа для послойной нарезки моделей. В списке совместимых принтеров несколько десятков марок с расширенным списком моделей.

Плюсы:

- простой интерфейс;
- для начинающих есть встроенные шаблоны настроек;
- для продвинутых предлагаются тонкие регулировки параметров печати и скрипты-плагины;
- в список принтеров разрешено добавить кастомный экземпляр;
- отображает время печати и расход филамента.

Минусы:

- невысокое качество готового объекта при стандартных настройках;
- расширенные настройки сложны для начинающих.

Новички часто не справляются с многочисленными регулировками и, разочаровавшись в результатах печати, ищут другой софт (Рисунок 6.7).

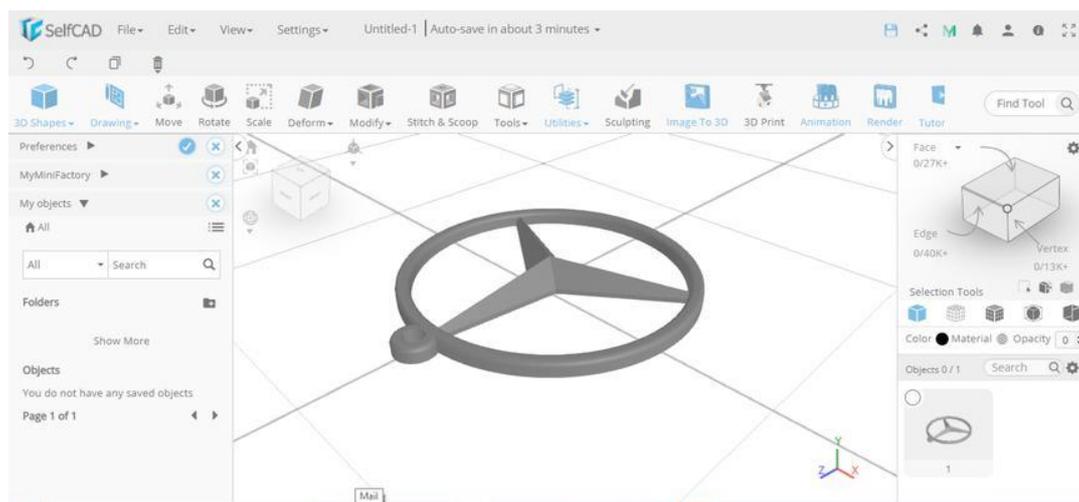


Рисунок 6.7 Интерфейс Ultimaker Cura

3DPrinterOS.

Это облачный сервис для создания сети принтеров и управления ими. Рекомендуется

для образовательных учреждений, мелкосерийных производств. Работает с файлами разных форматов: CAD, OBJ, STL, G-code и пр.

Плюсы:

- доступ к принтерам и файлам из любой точки мира;
- широкий выбор инструментов для подготовки объекта к 3D-печати;
- не требует установки на ПК.

Минусы:

- незначительный выбор настроек.

Slic3r

В приложении Slic3r реализованы функции, которые не имеют аналогов. Разработчики — Alessandro Ranelucci и сообщество RepRap — предоставили открытый исходный код, чтобы на основании их идей появлялись другие программные продукты для обработки и слайсинга цифровых моделей для 3D-принтера. Такая опция, как трехмерное сотовое заполнение, которую можно встретить в некоторых слайсерах, — это полностью заслуга программистов, написавших Slic3r (Рисунок 6.8).

Плюсы:

- большой выбор шаблонов заполнения;
- расширенный план настроек, особенно скоростей печати;
- работает с принтерами SLA и DLP;
- реализована возможность передачи файлов по USB;
- есть интеграция с OctoPrint в режиме «печать в один клик».

Минусы:

- при таком количестве настроек отсутствует редактирование поддержек;
- возникают проблемы с организацией оболочек вокруг модели.

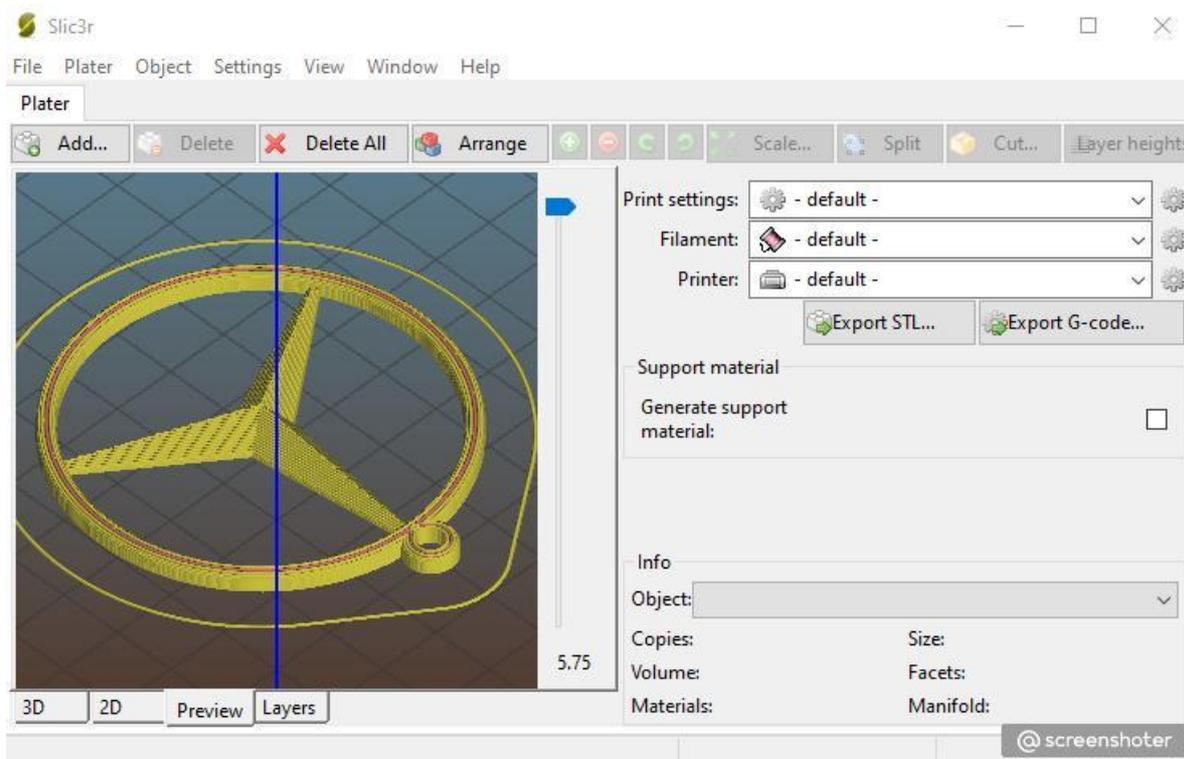


Рисунок 6.8 Интерфейс Slic3r

IceSL

Мощное ПО для подготовки цифровых объемных деталей. Программисты постоянно

совершенствуют программу, добавляя полезные функции:

- оптимизацию толщины слоев;
- стереометрические заполнители;
- самонесущие полости;
- «живую» интерактивную настройку;
- улучшенные возможности печати филаментом двух разных цветов и прочие новаторские идеи.

Важно! IceSL подходит для воспроизведения деталей сложной формы.

Плюсы:

- добавлена функция послойного мониторинга G-кода;
- открыт доступ редактирования полигональной сетки на языке скриптов Lua;
- есть поддержка двухцветной печати;
- детали сложных форм отличаются хорошим качеством печати.

Минусы:

- для пользователей, обладающих специфическими знаниями в области кодирования и проектирования 3D-объектов;
- владельцам устройств на macOS придется поискать другое приложение.

SliceCrafter

Если IceSL выбирают продвинутые пользователи, то для новичков разработчики предоставили браузерную версию слайсера — SliceCrafter (Рисунок 6.9). В нем реализованы почти все функции, которыми может похвастаться старший брат IceSL.

Плюсы:

- не занимает места на ПК;
- не нужны сложные настройки — новички могут запускать печать с параметрами по умолчанию;
- простой интерфейс.

Минусы:

- без доступа к интернету не работает.

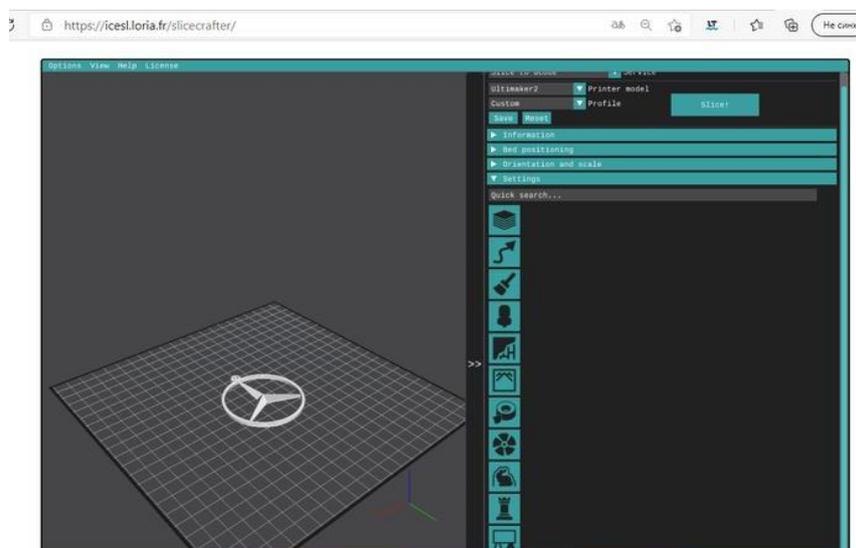


Рисунок 6.9 Интерфейс SliceCrafter

Чтобы выбрать программу-слайсер, нужно оценить свои навыки в области компьютерной грамотности и знания в 3D-печати. Все приложения для нарезки моделей предлагают приблизительно одинаковые опции и отличаются лишь числом расширенных настроек. Есть упрощенные версии и профессиональные программы, и те и другие можно

получить как бесплатно, так и по подписке. Из многочисленных программных продуктов каждый владелец 3D-принтера найдет наиболее подходящий для своих нужд (Табл. 6.1).

Таблица 6.1 Сравнение программ для 3D-принтеров.

Название	ОС	Платно/бесплатно	Языки	Квалификация пользователя
UP Studio	Windows, macOS, iOS	Бесплатная	Русский есть	Начинающие и продвинутые
FlashPrint	Windows, macOS, Linux	Бесплатно	Английский	Позиционируется как профессиональная, но подходит и для начинающих, и для продвинутых
IdeaMaker	Windows, macOS, Linux	Бесплатно	Русский, английский, китайский, японский, корейский	Для новичков и продвинутых
Simplify3D	Windows, Linux, macOS	Платная — \$149	Английский, русского нет	Начинающие и продвинутые
Cura	Windows, macOS, Linux	Бесплатно	Более 10 языков, русский есть	Новички и продвинутые
3DPrinterOS	Работа в браузере	Бесплатно	Английский	Новички
Astroprint	Браузер, Raspberry Pi, pcDuino	30-дневная триал-версия, затем от \$15 в месяц	Английский	Новички и продвинутые
Craftware	Windows, macOS, Linux	Бесплатно	4 языка, русский есть	Новички и продвинутые
Slic3r	Windows, macOS, Linux	Бесплатно	Английский	Продвинутые и профессионалы
IceSL	Windows, Linux	Бесплатно	Английский	Подготовленные продвинутые
SliceCrafter	Браузерная версия	Бесплатно	Английский	Новички
KISSlicer	Windows, Mac, Linux, Raspberry Pie	Лайт — бесплатно; про-версия — \$42	Русского нет	Новички и продвинутые
MakerBot Print	Windows, Linux, macOS	Бесплатно	Английский	Новички и опытные
MatterControl	Windows, Linux, macOS	Бесплатно	Английский	Любой уровень
Netfabb Standard	Windows, Linux	Стоимость от 17 171 руб. в месяц; 30-дневная триал-версия	Немецкий, английский	Профессионалы
OctoPrint	Raspberry Pi	Бесплатно	Английский	Продвинутые
Repetier	Windows, Linux, macOS	Бесплатно, но можно перечислить донат	Выбор из 25 языков, русский есть	Пользователи среднего и продвинутого уровней
SelfCAD	Работа в браузере	Триал-версия 10 дней, затем \$14,99 в месяц, \$139,99 в год или за \$599 купить лицензию навсегда	Английский	Новички, продвинутые
Tinkerine Suite	Windows, начиная с XP, macOS	Бесплатно	Английский	Начинающие пользователи среднего уровня
Z-Suite	Windows, macOS	Бесплатно	9 языков, русского нет	Новички и продвинутые

6.1.3. Управляющие программы

Управляющие программы предназначены именно для этого — управления рабочими процессами во время 3D-печати. Хотя в практически любой 3D-принтер можно вставить накопитель с G-кодом и нажать на кнопку запуска, это не всегда удобно, особенно когда приходится работать с несколькими 3D-принтерами одновременно, а тем более делать это удаленно. Здесь на помощь и приходят управляющие программы. К тому же, некоторые из них предлагают дополнительный функционал, включая слайсинг и даже редактирование 3D-моделей [37].

OctoPrint.

Программно-аппаратный комплекс с веб-интерфейсом, требующий подключения к 3D-принтеру через микрокомпьютер вроде Raspberry Pi, оснащенный модулем Wi-Fi. Эта система позволяет управлять 3D-принтерами удаленно. OctoPrint принимает G-код практически с любого слайсера и предоставляет возможность визуализации — просмотра файлов до и во время 3D-печати. Как вариант, можно загружать и обрабатывать STL-файлы прямо в OctoPrint (Рисунок 6.10).

OctoPrint не только предоставляет все необходимые инструменты для удаленного управления, но и позволяет отслеживать выполняемую работу с помощью уведомлений через различные мессенджеры.

Это полностью бесплатная программа с открытым кодом с множеством плагинов, созданных энтузиастами и доступных на официальном сайте.

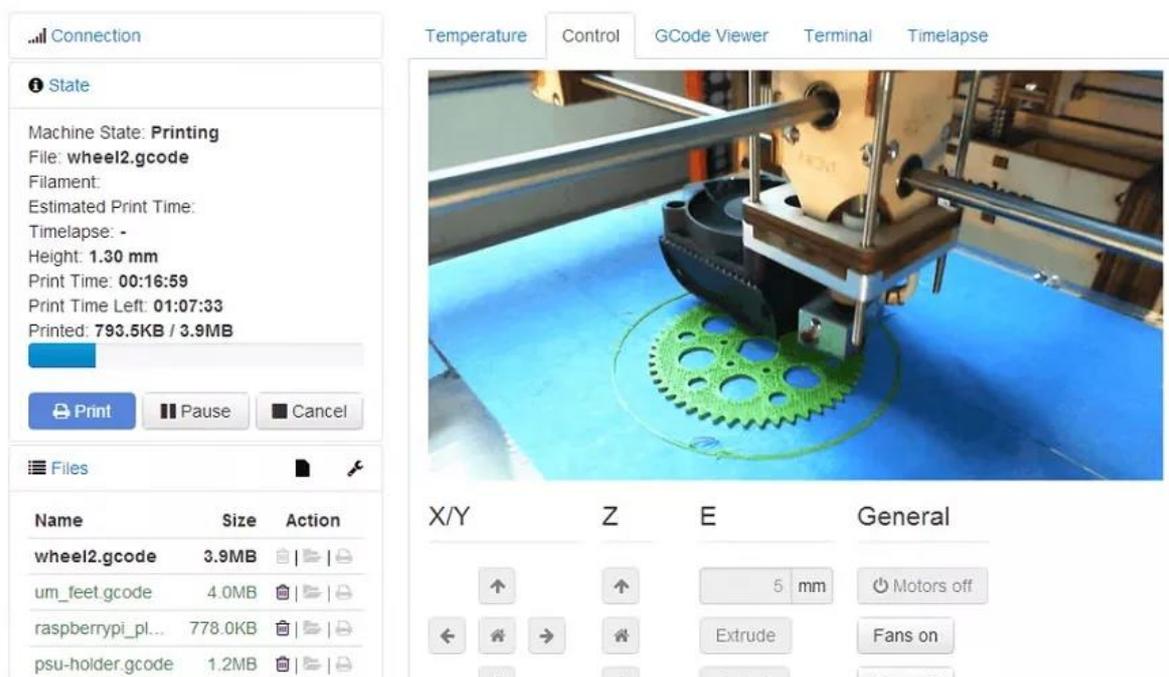


Рисунок 6.10 Интерфейс OctoPrint

MatterControl.

MatterHackers предлагает свою собственную управляющую программу, слайсер и 3D-редактор в одной упаковке (Рисунок 6.11). MatterControl позволяет напрямую управлять и наблюдать за 3D-печатью, слайсить, экспортировать G-код на SD-карты для автономной печати и даже создавать 3D-модели с нуля. Для работы под управлением MatterControl 3D-принтеру потребуется подключение через Wi-Fi или USB.

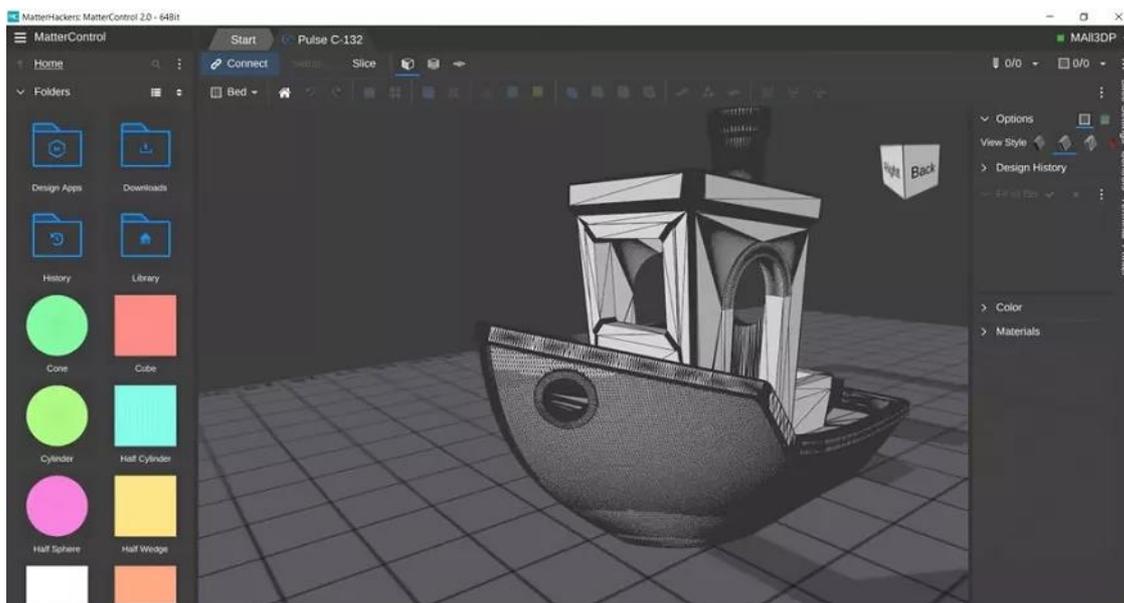


Рисунок 6.11 Интерфейс MatterHackers

Интерфейс хорошо структурирован: с левой стороны расположены браузер файлов и библиотека простых геометрических фигур. Что интересно, эти фигуры можно перетаскать в 3D-модель и использовать в качестве опорных структур.

Основной функционал доступен в бесплатной базовой версии, продвинутые пользователи могут заплатить за апгрейд до MatterControl Pro.

AstroPrint.

AstroPrint — это облачная управляющая платформа, позволяющая удаленно мониторить и управлять несколькими 3D-принтерами одновременно, хранить файлы, преобразовывать 3D-модели в G-код и отслеживать статистику рабочих процессов. Функционал варьируется от базового в бесплатной версии до продвинутого с разными уровнями платных подписок (Рисунок 6.12).

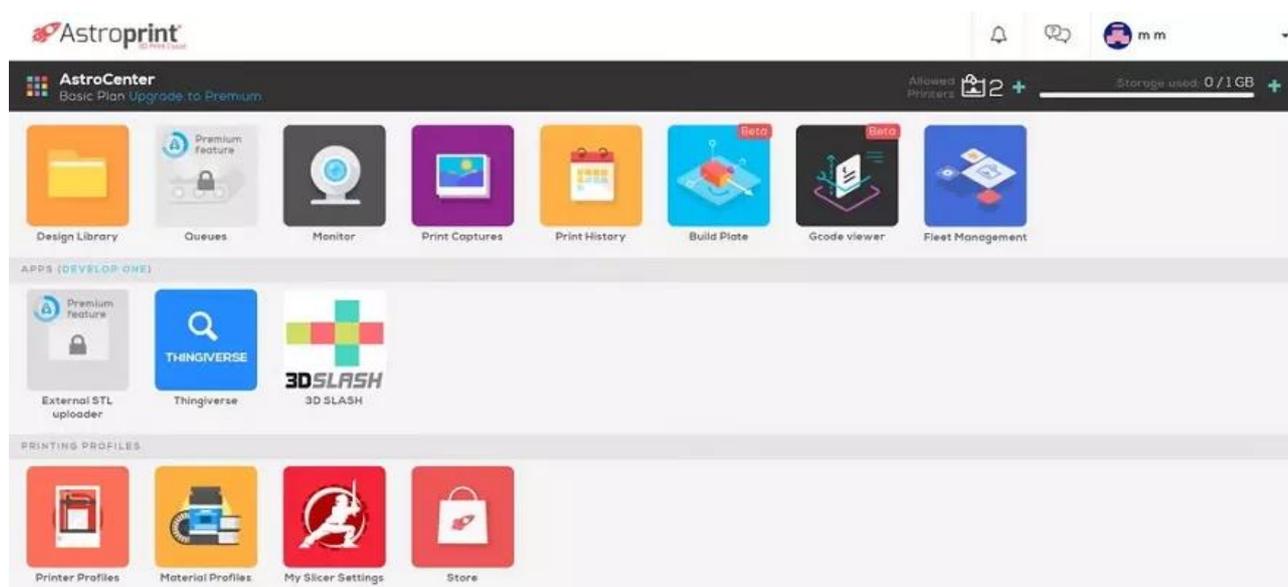


Рисунок 6.12 Интерфейс AstroPrint

Для полноценной работы с AstroPrint 3D-принтеру потребуется модуль Wi-Fi. В связке с Raspberry Pi система похожа по функциональности на OctoPrint: можно обрабатывать модели и посылать готовый код на 3D-принтер через веб-интерфейс без необходимости в

дополнительном программном обеспечении. Еще один плюс — интеграция с популярными репозиториями 3D-моделей Thingiverse и MyMiniFactory, а также 3D-редакторами 3D Slash и Leopoldy.

6.2 Программное обеспечение 3D сканирования

6.2.1. Программное обеспечение для 3D-сканеров

Программное обеспечение для 3D-сканеров можно разделить на две основные категории - ПО от производителя 3D-сканера и ПО от стороннего производителя [38-39].

Так как сам по себе сканер не работает. Необходимо специальное программное обеспечение которое создаётся производителем 3D-сканеров. В подавляющем большинстве случаев данные программы поставляются вместе с 3D-сканером.

Первая категория ПО как правило поставляется в комплекте с 3D-сканером и позволяет управлять процессом сканирования. ПО от производителя плюс 3D-сканер создают программно-аппаратный комплекс, который позволяет максимально эффективно использовать все возможности конкретного оборудования. Данная категория программного обеспечения может так же обладать дополнительным функционалом. Как правило, оно включает в себя возможность работы с облаком точек; удаление и очистку сканов от лишнего "мусора" и артефактов; возможность сшивки нескольких сканов в одно целое; работу с системами фотограмметрии. Программное обеспечение у более продвинутых производителей так же может включать в себя модули для обратного проектирования и контроля геометрии, а так же различные дополнительные специализированные функции, например для работы со сканированием трубопроводов, измерительные инструменты для авиационной отрасли и др.

Но помимо программного обеспечения от производителей 3D-сканеров существует так же ПО от сторонних компаний, которые, как правило, больше специализируются именно на выпуске программных продуктов, а не железа.

Преимущества ПО из второй категории в том, что оно использует многолетние наработки и алгоритмы от производителей специализирующихся именно на выпуске программ и плагинов. Программное обеспечение из данной категории обладает расширенным функционалом и инструментарием для решения различных задач, но, как правило, поставляется за дополнительную плату, которая зависит от количества подпрограмм и плагинов, а так же типом (локальные/сетевые), и количества лицензий.

Приступая к обзору программного обеспечения для трехмерного моделирования и проектирования, необходимо очертить две глобальные задачи, на решение которых оно нацелено:

- обработка данных 3D-сканирования и моделирования;
- подготовка моделей к 3D-печати.

Важно понимать, что сам по себе процесс сканирования – только первый этап работы, это просто сбор «сырой» информации. Чтобы получить конечный результат, мы должны обработать сканы с помощью специализированного ПО.

Задача программного обеспечения этого типа – создание виртуальной трехмерной копии физического объекта для ее последующего использования в системах автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства и инженерного анализа (CAD/CAM/CAE).

После того как сканирование выполнено, полученная информация обрабатывается в специализированном ПО. 3D-сканеры представляют данные в виде облака точек, а современные модели – в виде полигональных моделей (точек, которые сшиваются между собой методом триангуляции). С помощью ПО можно устранить ошибки в отсканированной модели, создать набор NURBS-поверхностей, спроектировать полноценные параметрические твердотельные модели, проанализировать возможные изменения и

погрешности, провести исследования, сравнительный анализ, а также контроль размеров и качества физического объекта.

Обработка данных сканирования решает следующие задачи:

- контроль геометрии (в том числе в процессе эксплуатации для измерения износа, входной и выходной контроль изделий);
- обратное проектирование (для восстановления и/или оптимизации формы детали, обратный инжиниринг и построение CAD-модели);
- измерение реальных зданий, сооружений и других объектов для их реконструкции или перепланировки;
- проверка изделий на собираемость;
- создание цифровых архивов.

На производстве 3D-сканирование применяется прежде всего для контроля геометрии и реверс-инжиниринга.

Обратное проектирование затрагивает все этапы производства от готового изделия к проекту. Оно позволяет воссоздать объекты или их элементы в случае отсутствия конструкторской документации (в том числе изношенные или устаревшие с целью их модернизации). В полученную 3D-модель вносятся необходимые корректировки, можно изменить масштаб, геометрию и т.д. Реверс-инжиниринг – это далеко не всегда копирование, это прежде всего возможность перенести физический объект или отдельные его элементы в цифровую форму для последующего создания усовершенствованных или принципиально новых продуктов средствами промышленного дизайна. Готовая CAD-модель может быть использована для изготовления изделия как аддитивными, так и традиционными методами.

При контроле качества в серийном производстве 3D-сканер, в сравнении с классическими инструментами измерения, позволяет существенно сэкономить время и трудозатраты, в том числе за счет частичной автоматизации процесса.

В каких отраслях востребовано 3D-сканирование:

- машиностроение;
- авиакосмическая промышленность;
- приборостроение;
- ювелирное дело;
- медицина;
- наука и образование;
- архитектура, дизайн, искусство.

Рассмотрим основные функциональные возможности и преимущества ПО для обработки данных сканирования:

- PointShape: профессиональные решения для реверс-инжиниринга и контроля геометрии
- FARO: от построения плана зданий до выявления отклонений
- Geomagic: универсальные инструменты для обработки данных сканирования
- Steaform: простая и быстрая обработка данных

PointShape Design: профессиональные решения для реверс-инжиниринга и контроля геометрии (Рисунок 6.13)

PointShape (Южная Корея) – опытный разработчик программных продуктов в сфере 3D-сканирования. Софт совместим с основными CAD-программами, предлагает интеллектуальные инструменты для автоматизации рабочих процессов и имеет интуитивно понятный и удобный интерфейс. Решения южнокорейских разработчиков по возможностям и функционалу не уступают западным аналогам, которые в настоящее время недоступны на российском рынке.

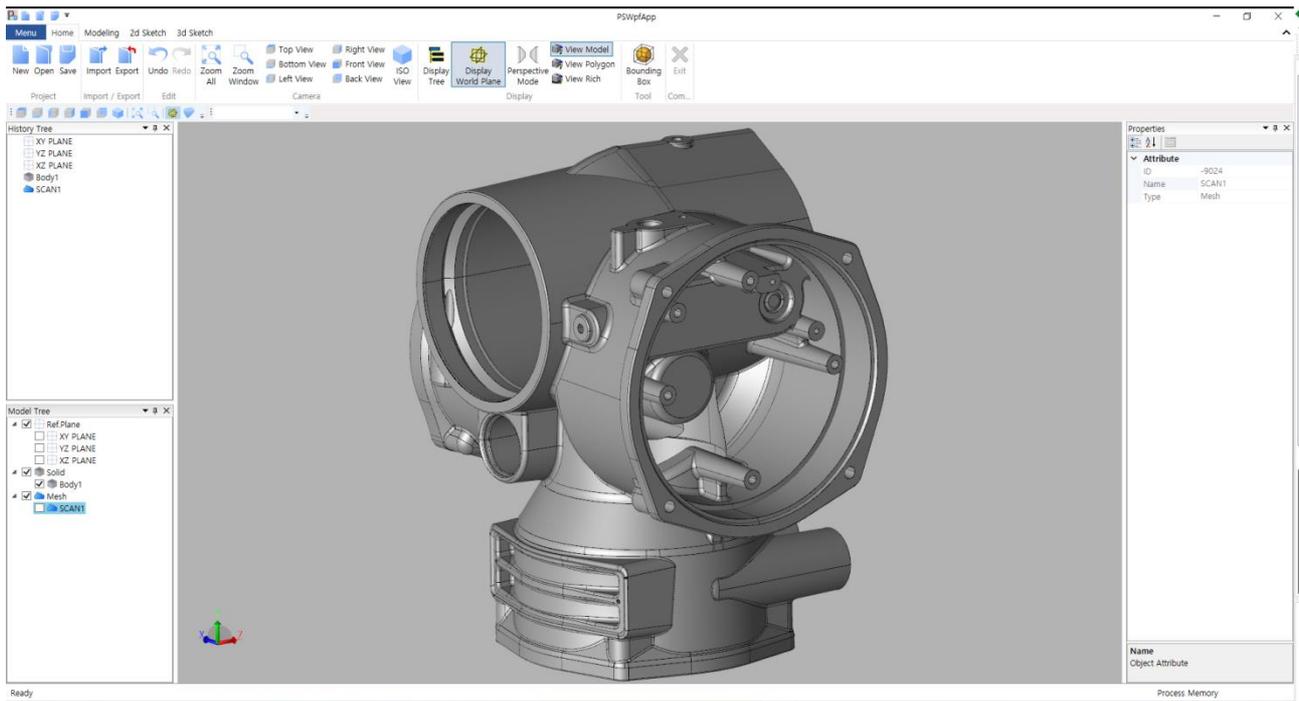


Рисунок 6.13 Интерфейс PointShape Design

PointShape Design – полнофункциональное решение для обратного проектирования, начиная с данных 3D-сканирования до создания твердотельной параметризованной модели (CAD).

- Удобная работа с облаками точек благодаря инструментам выравнивания, слияния, удаления и фильтрации шума.
- Простые в использовании инструменты редактирования полигонов обеспечивают быстрое заполнение отверстий, сглаживание, децимацию, разделение, оптимизацию и инструменты восстановления.
- Создание оптимизированной сетки для 3D-печати с помощью функции тесселяции.
- Возможность быстрого редактирования поверхности твердотельной модели, включая логические операции, скругление, фаску, обрезку поверхности и расширение поверхности.
- Полное воссоздание моделей по отсканированным данным.
- Интуитивно понятный и удобный интерфейс.

PointShape Inspector – идеальный инструмент обработки данных 3D-сканирования и контроля геометрии (Рисунок 6.14).

- Позволяет трансформировать облака точек в трехмерные полигональные модели.
- Точные данные для контроля качества и геометрии объекта.
- Совместимость с основными CAD-программами: AutoCAD, Inventor, SolidWorks, Solid Edge, Siemens NX, CATIA V5 и другими.
- Полное воссоздание моделей по отсканированным данным.
- Составление полноценных отчетов с возможностью автоматического создания результатов анализа.

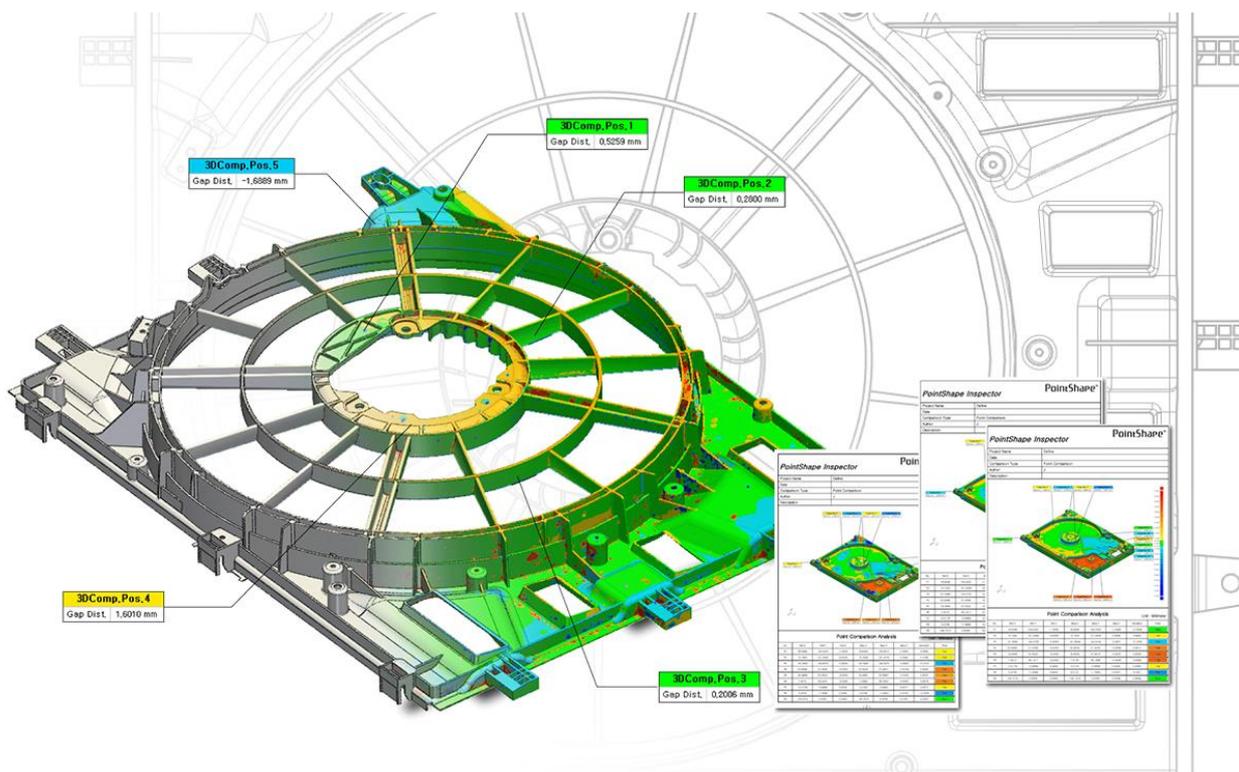


Рисунок 6.14 Интерфейс PointShape Inspector

FARO: от построения плана зданий до выявления отклонений.

FARO – один из мировых лидеров на рынке 3D-измерений. В частности, компания выпускает наземные лазерные 3D-сканеры для оцифровки крупных объектов и ландшафтов. Для обработки данных сканирования FARO предлагает следующие программные продукты (Рисунок 6.15).



Рисунок 6.15 Интерфейс FARO

1. SCENE – эффективное ПО для работы со сканами. Ключевые возможности SCENE – получение данных со сканера, объединение сканов, визуализация

полученной информации, проведение измерений, экспорт файлов. Включает набор плагинов с расширенными функциями для оптимизации 3D-моделей. Данные проектов можно выкладывать в интернет благодаря интеграции с WebShareCloud. В версии SCENE 2019 доступны новая цветовая балансировка и улучшенная визуализация 3D-проектов.

2. SCENE WebShare Cloud – облачная платформа для работы с оцифрованными 3D-данными для BIM-моделирования и управления проектами из любой точки мира в режиме реального времени.
3. As-Built – передовая программная платформа, предназначенная для интеграции 3D-данных после обработки в FARO SCENE с возможностью дальнейшего моделирования в AutoCAD и Revit. As-Built восполняет функционал этих САПР, который необходим при 3D-моделировании или анализе информации, полученной из мобильных картографических систем и ручных и наземных лазерных сканеров. Это особенно актуально в контексте активного внедрения технологий BIM/CIM.
4. BuildIT Construction – первый полностью интегрированный программный продукт для контроля качества в строительстве. Позволяет значительно увеличить эффективность рабочих процессов благодаря передовым функциям выравнивания и проверки геометрии, сжатия файлов, быстрой обработки облака точек, оценки геометрических размеров и допусков, импорта файлов и пр. FARO BuildIT дает возможность обнаружить ошибки на каждом этапе строительства и, как следствие, существенно сократить затраты времени и средств.

Geomagic: универсальные инструменты для обработки данных сканирования

Наиболее продвинутые инструменты для обработки данных сканирования – ПО Geomagic от компании 3D Systems: Wrap, Control X, Design X, плагин для SolidWorks, а также комплект ПО для образовательных учреждений.

В программах 3D-сканирования Geomagic реализованы инновационные технологии топологического распознавания форм и их дальнейшего преобразования в твердотельную модель с сохранением истории. Они обеспечивают оперативное проектирование конструкторской документации либо восстановление утраченных чертежей посредством реверс-инжиниринга, а также позволяют выполнять детальный анализ отклонений и износа с возможностью автоматизации выгрузки отчетов. В плане скорости и эффективности это отличные решения для «лечения» и преобразования областей сканирования, а по универсальному набору функций и алгоритмов обработки данных им нет аналогов на рынке.

Geomagic Wrap: удобная работа в 3D.

Высокопроизводительная программа для обработки области точек и полигональной сетки. Это быстрый и точный инструмент для дизайна, моделирования, «лечения» и оптимизации с сохранением качества текстуры и фактуры. Wrap дает возможность легко преобразовать трехмерные данные в точные 3D-модели, которые можно незамедлительно использовать в различных сферах, передавать в 3D-печать или архивировать. Wrap по удобству работы с трехмерными объектами – своего рода Photoshop в мире 3D (Рисунок 6.16).

Wrap – это:

- наличие сценариев макросов для автоматизации процессов;
- самый простой способ сохранить, преобразовать текстуру и фактуру поверхности, в том числе и в карту текстуры;
- инновационная возможность преобразования скрученных поверхностей в плоские для их измерения, моделирования текстуры и фактуры, создания 2D-эскизов;

- простой и оперативный способ создать из области точек 3D-модель для печати;
- поддержка всех трехмерных цифровых преобразователей, камер и сканеров формата XYZ/ASCII и обработка упорядоченных и неупорядоченных данных поверхностей и объемов.

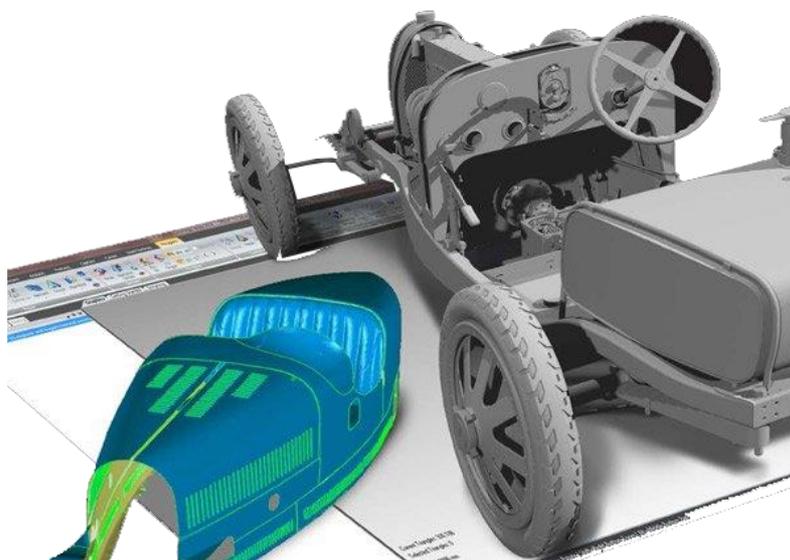


Рисунок 6.16 Geomagic Wrap

Geomagic Control X: мощный софт для контроля геометрии.

Гибкий программный продукт для выявления и решения проблем в области контроля качества, предлагающий многофункциональные и интуитивно понятные инструменты измерения, управления и анализа (Рисунок 6.17).

Непосредственная задача ПО – сравнение данных 3D-сканирования эксплуатационного изделия с эталонной моделью и составление полноценных отчетов в удобном формате. Процесс формирования отчетности может быть автоматизирован, а полученной информацией легко обмениваться со всеми участниками проекта. Control X позволяет значительно повысить показатели предприятия при выполнении проверок качества продукции.

Control X – это:

- возможность сравнения полученных сканов как с эталоном, так и с другими данными;
- контроль и анализ полученной информации в сравнении как с эталоном, так и с другими данными;
- настраиваемые выгружаемые отчеты, с возможностью автоматизации контроля;
- поддержка данных, полученных не только с помощью 3D-сканирования, но и другими способами;
- поддержка большого количества форматов, что позволяет контролировать и анализировать данные из различных источников;
- интуитивно понятный интерфейс.

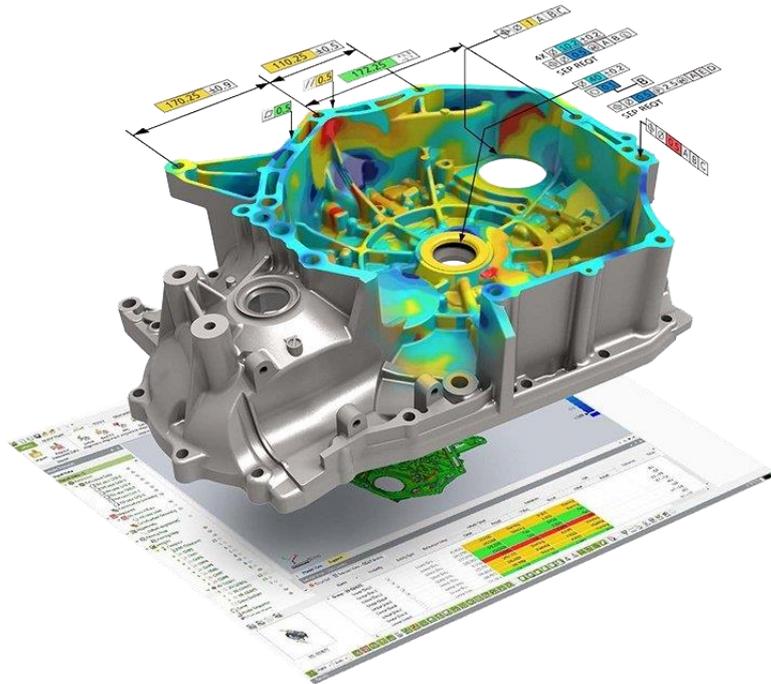


Рисунок 6.17 Geomagic Control X

Geomagic Design X: новые возможности работы в САПР.

Наиболее комплексное ПО для реверс-инжиниринга, начиная с обработки данных сканирования до создания твердотельной параметризированной модели (CAD) (Рисунок 6.18).

Design X быстро обрабатывает сканы моделей, позволяя сэкономить средства на реализацию проекта и быстрее вывести продукт на рынок. ПО предлагает обширный выбор передовых инструментов САПР и работы со сканами и будет незаменим в сложных проектах.

В частности, у этой программы 3D-сканирования есть специальный инструмент для предварительной обработки полигональных моделей, ускоряющий дальнейшую работу (удаление шумов, острых граней, самопересечений, микротоннелей и т.п.).

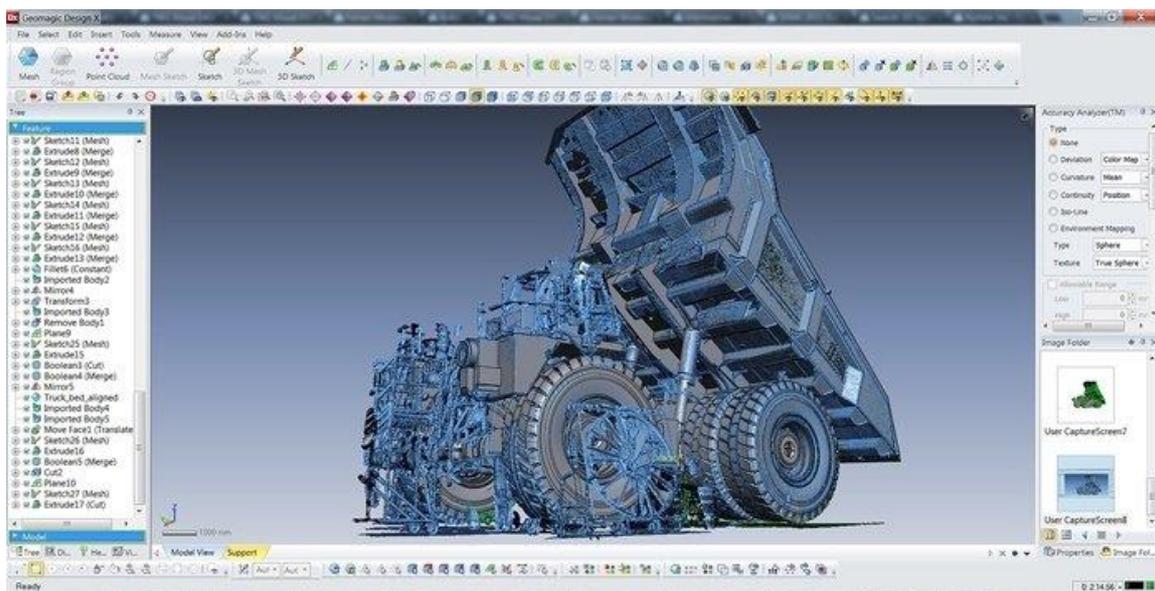


Рисунок 6.18 Geomagic Design X

Design X – это:

- возможность создания дерева построения CAD-детали в наиболее распространенных международных САПР;
- воссоздание истории построения CAD-детали в самых передовых САПР;
- быстрое воссоздание моделей по сканам;
- многообразие инструментов и алгоритмов обработки.

Geomagic for SolidWorks: кратчайший путь от физического объекта к рабочей среде CAD.

Еще одно программное решение для реверс-инжиниринга с широким набором функций. Это набор программных инструментов, который обеспечивает расширенные возможности по использованию облаков точек и многоугольников в процессе проектирования. Представляет собой плагин, совместимый с популярными моделями 3D-сканеров и поддерживающий импорт стандартных форматов точечных и полигональных файлов (Рисунок 6.19).

Geomagic for SolidWorks – это:

- скоростная автоматизированная обработка облака точек;
- мощные инструменты выравнивания;
- автоматическая обработка поверхности;
- формирование поперечных сечений сеток;
- 3D-сравнение с анализом отклонений начального уровня;
- контроль отклонений на всех этапах проектирования;
- создание высококачественных твердотельных моделей;
- интеграция с промышленными 3D-сканерами для работы по прямой схеме «сканер – SolidWorks», включая FARO, Hexagon, Nikon, Vialux и Capture от 3D Systems;
- дружелюбный, интуитивно понятный интерфейс.

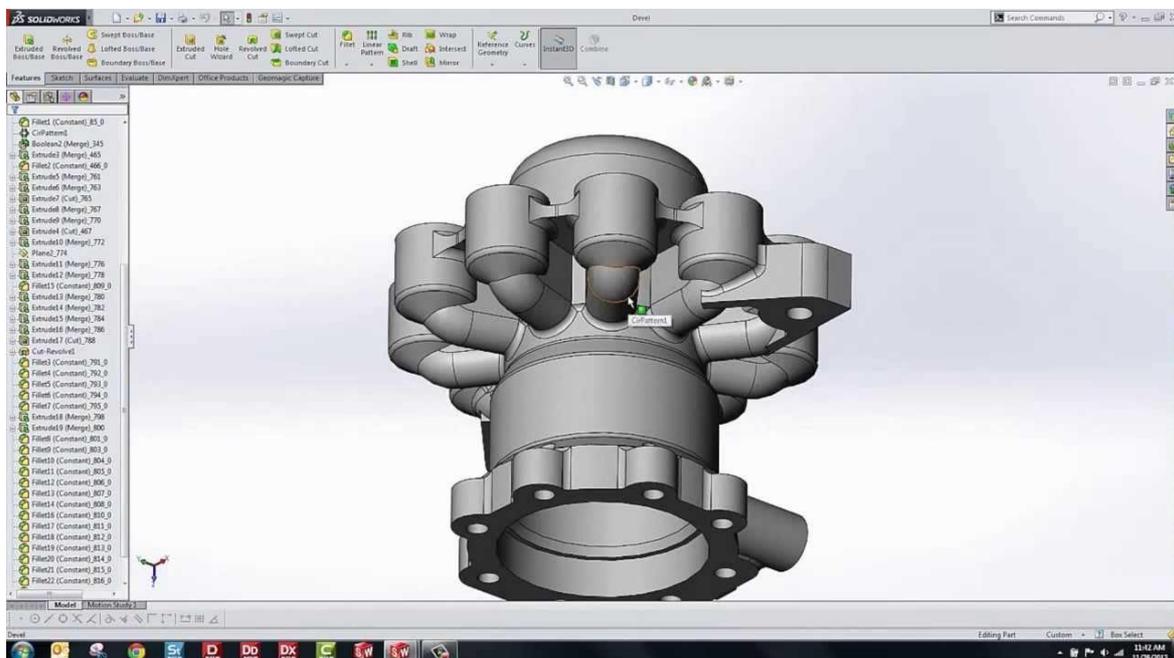


Рисунок 6.19 Geomagic for SolidWorks

Creaform: простая и быстрая обработка данных сканирования.

Компания Creaform поставляет свои устройства в комплекте с полностью интегрированным программным обеспечением VXelements, плюс отдельно можно

приобрести модули VXModel и VXInspect.

1. VXelements – универсальная платформа, объединяющая все важнейшие элементы и инструменты в рамках удобной для пользователя, простой и оптимизированной рабочей среды (Рисунок 6.20).
2. VXmodel – ПО для реверс-инжиниринга. Преобразует данные 3D-сканирования для использования во всех распространенных программах САПР или 3D-печати.
3. VXinspect – ПО для контроля качества.
4. VXscan-R – комплексный программный модуль для роботизированных систем 3D-сканирования, обеспечивающий эффективное создание цифровых двойников и позволяющий с легкостью корректировать параметры сканирования, моделировать 3D-сканы и экспортировать полученные модели в метрологическое ПО.
5. SmartDENT 3D – софт для решения задач неразрушающего контроля (NDT), который в сочетании с 3D-сканером HandySCAN 3D активно применяется авиакомпаниями и организациями по техническому обслуживанию, ремонту и капитальному ремонту для быстрого и точного анализа вмятин и выбоин корпуса судна.

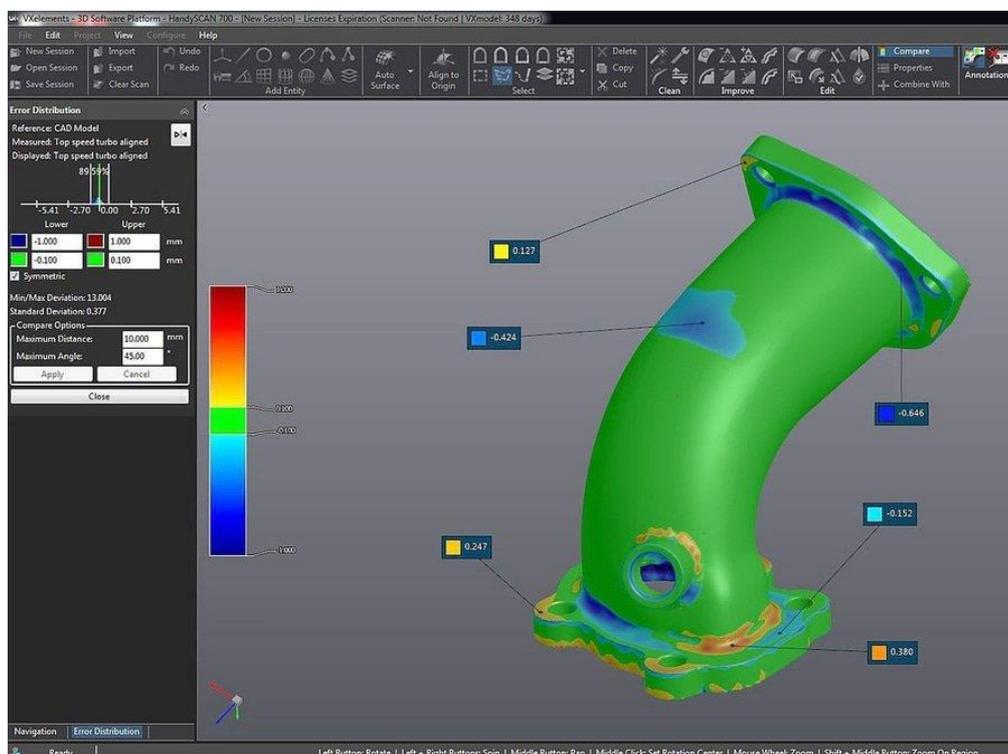


Рисунок 6.20 Интерфейс VXelements

Программное обеспечение, поставляемое с 3D-сканерами.

Помимо создания трехмерных моделей на основе изображений, также можно использовать лазерные и структурированные световые проекции. Когда речь идет о программном обеспечении для 3D-сканирования такого типа, оно часто поставляется вместе с оборудованием для 3D-сканирования, в основном это лазерные 3D сканеры.

Creaform выпускает отдельную линейку доступных профессиональных сканеров reel 3d, для которых разработано специальное ПО. Это интуитивно понятная программа 3D-сканирования, позволяющая значительно ускорить и оптимизировать работу с полученными данными. Программный продукт reel 3d имеет все необходимые функции для ручного и автоматического выравнивания системы координат и поддерживает различные форматы

экспорта файлов.

Artec Studio. Это безусловно, один из лидеров в индустрии программного обеспечения для 3D-сканирования. Это профессиональный набор инструментов и инновационных алгоритмов. Еще одна замечательная особенность Artec — это удобство и интуитивность U I.

PolyWorks. Этот софт используется 3D-сканерами ShapeGrabber разработанными компаниями Innovmetric, PolyWorks анализирует 3D-модель на предмет качества и точности. Он используется профессионалами в аэрокосмической, медицинской, автомобильной и других отраслях промышленности.

Volume Graphics. Это ПО широко используется для 3D-сканирования в автомобильной и электронной промышленности. Он позволяет анализировать и визуализировать трехмерные данные для метрологии, контроля качества, разработки продукции и анализа повреждений.

6.2.2. Программы для фотограмметрического 3D сканирования

Фотограмметрия — это технология, основанная на обработке фотографий с разных ракурсов для создания ваших 3D-моделей [39]. На рынке присутствует множество программ для этих целей (Табл. 6.1).

Таблица 6.1 Программы для фотограмметрического 3D сканирования

Название	ОС	Тип	Формат файлов	Стоимость
3DF Zephyr	Windows	Дальний диапазон Ближний диапазон	Ply, obj, fbx, pdf 3D, u3d, dae, pts, ptx, xyz, txt, las, e57	Бесплатная стандартная версия/ Premium 149- 3 900€
Agisoft Metashape	Windows MacOS Linux	Дальний диапазон Ближний диапазон	fbx	179- 3 500\$/Бесплатная образовательная лицензия
Autodesk ReCap	Windows	Дальний диапазон Ближний диапазон	Asc, cl3, clr, e57, fls, fws, isproj, las, pcg, ptg, pts, rds, txt, хyb, xyz, zfs, zfprj	310\$ в год
Bentley ContectCapture	Windows	Дальний диапазон Ближний диапазон	3ms, 3sm, kml, dae, fbx, obj, dae, stl	по запросу
COLMAP	Windows MacOS Linux	Дальний диапазон Ближний диапазон	Ply, vrml	Бесплатно
DroneDeploy	Windows MacOS Android iOS	Дальний диапазон	Dxf, GeoTIFF, las, obj, xyz	149\$ в месяц
IMAGINE Photogrammetry	Windows	Дальний диапазон	Img, las, ascii igg, boaa, rpf, ddf, dem, til, dt2, ecrg, hdr, url (...)	по запросу
Meshroom	Windows Linux	Дальний диапазон Ближний диапазон	Abc, obj	Бесплатно
MicMac	Windows MacOS Linux	Дальний диапазон Ближний диапазон	Georiff, ply, xml	Бесплатно
OpenMVG	Windows MacOS Linux	Дальний диапазон Ближний диапазон	Gis, geotiff,	Бесплатно
Photomodeler	Windows	Дальний диапазон Ближний диапазон	3ds, 3dm, dxf, igs, kml, kmz, las, ma, ms, obj, pts, byu, facet, iv, ply, stl, txt, wrl	995\$ / 49\$ в месяц
Pix4D	Windows MacOS Android iOS	Дальний диапазон	Obj, fix, dxf, las, kml, tif, ocgb, slpk, shp	3 990€ / 260€ в месяц

3DF Zephyr

3DF Zephyr является одним из лидеров на рынке благодаря своему пользовательскому интерфейсу. Подойдет даже для неопытных пользователей, несмотря на это 3DF Zephyr предназначен не только для любителей. Профессионалы из разных областей могут использовать множество полезных инструментов, таких как возможность импорта 3D модели в программное обеспечение САПР.

Agisoft Metashape

Это профессиональное программное обеспечение для 3D-сканирования используемое как в ГИС-приложениях, так и для создания визуальных эффектов, исторической документации и разработки игр. Программное обеспечение способно работать и с аэрофотограмметрией.

Интересной особенностью Agisoft Metashape является то, что пользователь может создавать 4D-модели, поскольку программное обеспечение позволяет сохранять целые сцены в виде редактируемых 3D-объектов.

Autodesk ReCap

Autodesk ReCap расшифровывается как «Захват реальности» (Рисунок 6.21). Он использует фотографии, но также может применять лазерное сканирование для создания 3D-моделей. Может использоваться для аэрофотоснимков. Созданные 3D-объекты можно использовать в САПР и BIM программах. С этим программным обеспечением для 3D-сканирования вы сможете создавать высококачественные редактируемые модели.

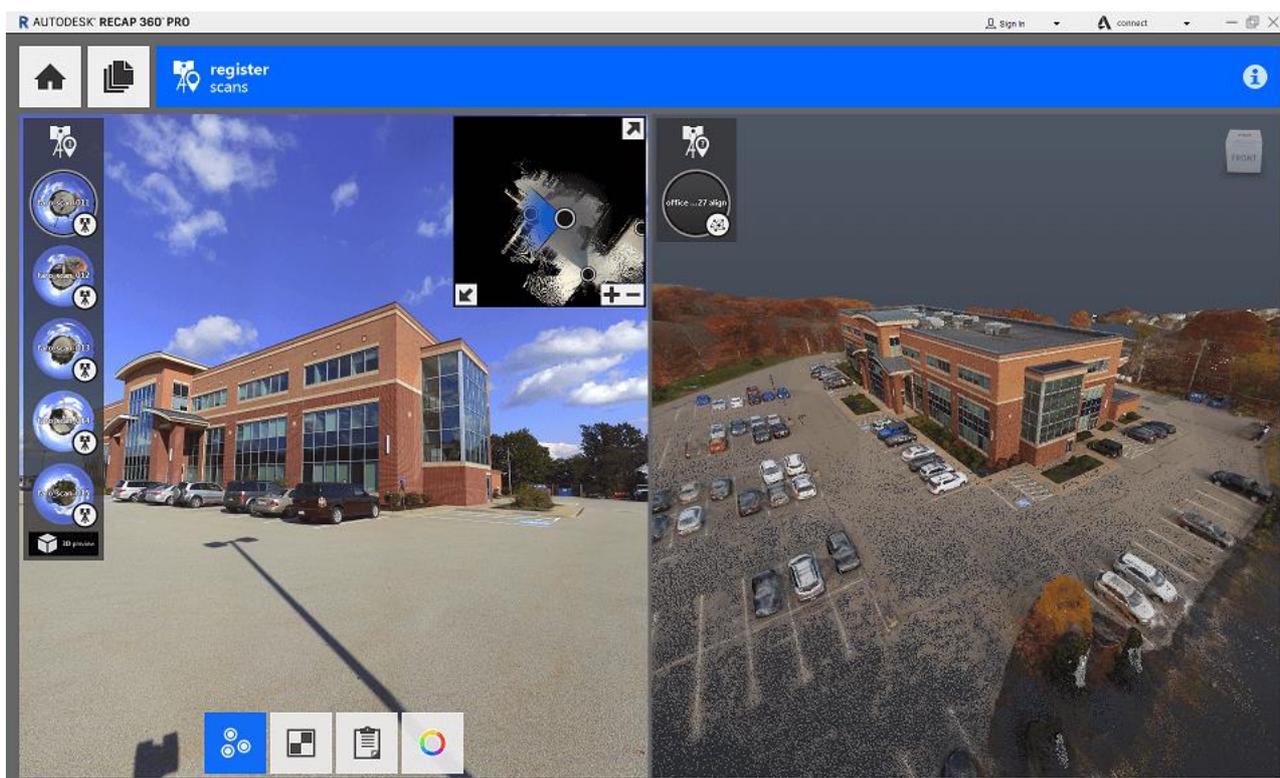


Рисунок 6.21 Autodesk ReCap

Bentley ContextCapture.

Это очень мощное профессиональное программное обеспечение для фотограмметрии, способное создавать целые инфраструктурные ландшафты. Это программное обеспечение хорошо подойдет для строительных проектов, может использоваться в совокупности с аэрофотограмметрией и лазерным сканированием для достижения лучших результатов. И это не предел с Bentley ContextCapture вы можете создавать даже анимированные 3D-модели.

Colmap.

Colmap позволяет создавать 3D-сетку как с использованием одной камеры, так и нескольких. Но редактировать 3D-модель в этом программном обеспечении не получится. Он отлично подходит для быстрого и простого 3D-сканирования. Приложение с открытым исходным кодом.

DroneDeploy.

Вы уже догадались, как следует из названия, это программное обеспечение для 3D-сканирования специально для дронов. Он состоит из двух приложений. Одно контролирует путь беспилотника и ведет его от взлета до посадки. Вторая программа аккумулирует фотографии и далее создает 3D-модель. Он предоставляет вам инструменты для измерения площадей, объемов и расстояний. Кроме того, вы можете добавить больше персонализированных функций. Подробную информацию об использовании продукта можно узнать на официальном [сайте компании DroneDeploy](#).

IMAGINE Photogrammetry.

IMAGINE — профессиональное программное обеспечение для фотограмметрии. Здесь важно учесть, планируете ли вы работать с картографическим 3D-сканированием. Он очень хорошо известен в отрасли и используется департаментом транспорта, коммерческими картографическими компаниями, а также национальными и региональными картографическими органами. Он предоставляет пользователям множество профессиональных инструментов, таких как например различные виды облаков точек, для преобразования фотографий и управления большими данными.

MicMac.

Это профессиональное программное обеспечение для фотограмметрии было создано Французским национальным географическим институтом и Французской национальной школой географических наук. Он предоставляет вам инструменты для научных и промышленных приложений. Он может быть использован для сканирования малых и больших объектов.

OpenMVG.

Это еще одно программное обеспечение с открытым исходным кодом для 3D-сканирования. Ей пользуются ученые, работающие в области компьютерного зрения и режиме множественной обзорной геометрии (MVG). Так же OpenMVG работает с технологией фотограмметрии Structure from Motion (SfM).

PhotoModeler.

Photomodeler позволяет создавать трехмерные объекты с помощью 3-х различных методов. Вы можете вручную подобрать общие характеристики, автоматически создать 3D-модель из заданных маяков или сопоставить облака точек перекрывающихся изображений. Это простое в использовании и доступное по цене программное обеспечение для 3D-сканирования.

Pix4D.

Это программное обеспечение для 3D-сканирования охватывает все инструменты в т.ч. аэросъемку с беспилотника. Это обеспечит правильность траектории вашего беспилотника, а затем позволит вам создавать ортомозаики, индексные карты, модели рельефа или облака точек для получения точной трехмерной модели. У вас также есть доступ к различным аналитическим инструментам, поэтому модель можно редактировать (Рисунок 6.22).

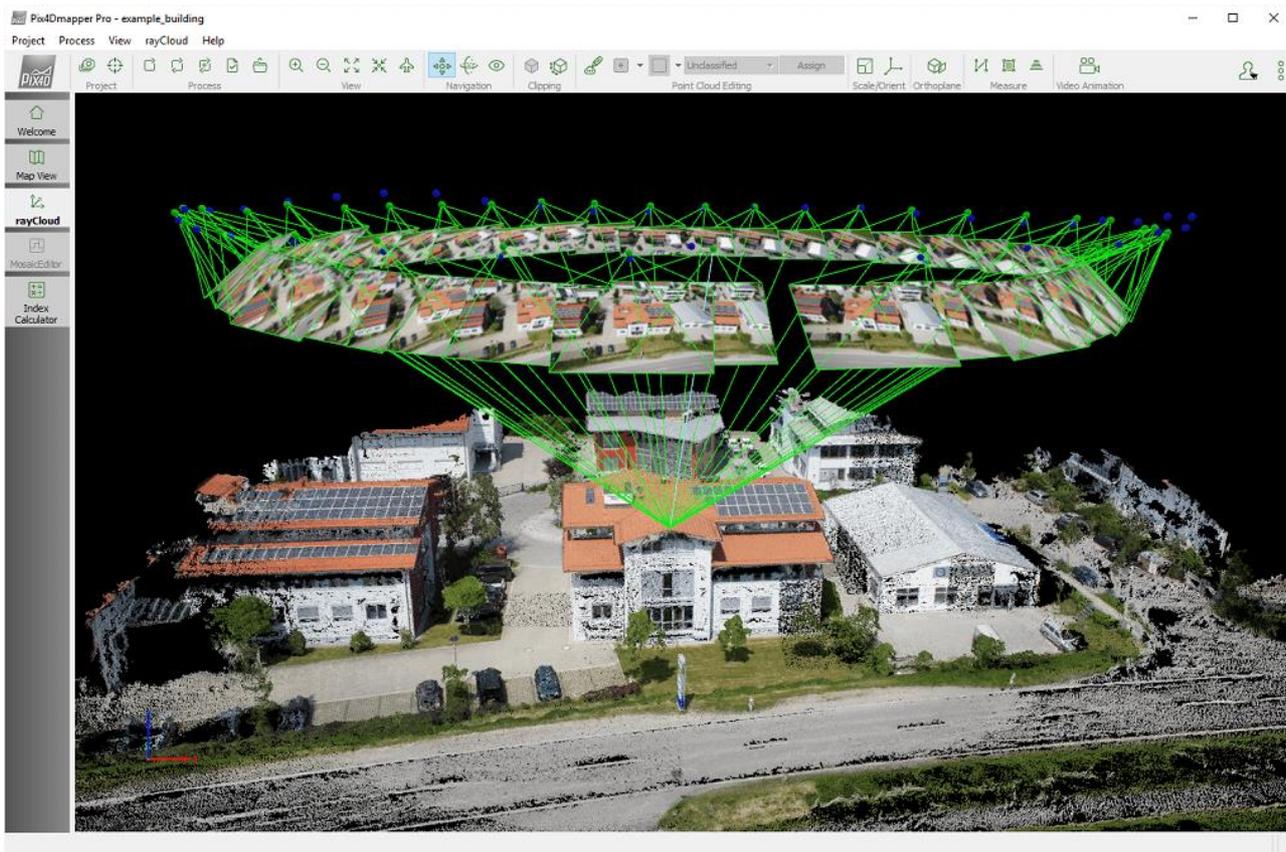


Рисунок 6.22 Интерфейс Pix4D

6.2.3. Приложения 3D-сканирования для смартфонов

Технология 3D-сканирования развивается настолько быстро, что вы можете использовать свой телефон для 3D-сканирования и создания 3D-модели [40]. Существуют специальные приложения, которые позволят вам превратить настоящий объект в 3D-модель всего за несколько кликов.

3D-сканирование на смартфоне — отличная альтернатива дорогостоящему оборудованию. Вы можете воссоздать некоторые из ваших любимых физических объектов в 3D формате (Табл. 6.2).

Таблица 6.2 Приложения - 3D сканеры для смартфонов Android и iPhone.

Название	ОС	Тип	Формат файлов	Стоимость
Qlone	Android iOS	Ближний диапазон	Obj, stl, ply, x3d	Бесплатно
Trnio	iOS	Ближний диапазон		0.99\$
Scann3D	Android	Ближний диапазон	Obj, stl, ply	Бесплатно
3D Creator	Android	Ближний диапазон		Бесплатно
Scandy Pro 3D Scanner	iOS	Ближний диапазон	Ply, obj, stl, usdz, glb	Бесплатно/ при неограниченном кол-ве загрузок — 1.99\$ в неделю 5.99\$ в месяц 49.99\$ в год

Ограничения:

- Вероятно, вы потратите много времени, пытаясь заставить работать многие из этих приложений и это может разочаровать людей, которые просто хотят хорошее сканирование.

- Чтобы получить максимально возможное качество из ваших 3D-сканов, необходима программная ретушь.
- Низкое качество изображения является распространенной проблемой в современных приложениях для 3D-сканеров, так как многим смартфонам не хватает необходимого качества оборудования для хорошего сканирования.

Технологии и операционные системы.

Большинство приложений трехмерного сканирования основаны на фотограмметрическом трехмерном сканировании, где несколько изображений одного и того же объекта делаются с разных углов — при этом целью является 360-градусный обзор рассматриваемого объекта. Затем приложение обрабатывает фотографии — в самом приложении или через облачный сервис — прежде чем «объединить» их вместе, чтобы сформировать 3D-модель.

По сравнению с Android, Apple и ее сообщество, похоже, более нацелены на 3D-сканирование. Компания оснащает новейшие устройства Apple точечным оборудованием для 3D-сканирования и превращает эти высококачественные гаджеты в мощные 3D-сканеры.

Qlone.

Особенности:

- Стоимость: бесплатно, но экспорт в Sketchfab или Shapeways стоит \$ 0,99 за один 3D-скан
- Платформы: iOS (9.0 или более поздняя версия), Android (5.0 и более поздняя версия)
- Количество оценок: 441 (Apple); 734 (Google Play)
- Рейтинг: 4.0 (Apple); 3,0 звезды (Google Play)
- Целевые пользователи: создатели контента AR / VR, витрины электронной коммерции, преподаватели STEM, энтузиасты 3D-печати

На первый взгляд, Qlone из EyeCue Vision Technologies LTD выглядит потрясающе. Встроенный просмотр AR, простой экспорт в Sketchfab и даже руководство AR, которое поможет вам сканировать.

Прежде чем начать сканирование, вам нужно будет распечатать платформу Qlone. Сканирование само по себе очень просто: вы просто нажимаете кнопку «плюс», а затем перемещаете свой телефон или объект, пока купол AR не станет прозрачным. После того, как программное обеспечение отобразит модель, вы сможете раскрасить и экспортировать ее.

Еще одна особенность Qlone заключается в том, что вы можете сканировать в более чем одной позиции и он объединит их для лучшего сканирования. Хотя эта функция иногда помогает, при сканировании обычно используются деформированные элементы, особенно искаженные вершины.

Одним из недостатков Qlone является то, насколько просты некоторые сканы. Чем больше ваш объект заполняет купол AR, тем лучше будет сканирование. Еще одна вещь, которая нам не нравится в приложении, это оплата за экспорт. Экспорт файлов GIF, видео, изображений в Sketchfab и социальные сети осуществляется бесплатно, а экспорт в CGTrader и Shapeways стоит 0,99 долл. США (14,99 долл. США за три месяца неограниченного экспорта). Даже экспорт файла OBJ или STL не является бесплатным. Вместо этого вы должны либо платить доллар за каждый экспорт, либо покупать кредиты, чтобы «разблокировать» модель.

Trnio.

Особенности:

- Стоимость: 2,99 \$
- Платформа: iOS (11.3 или более поздняя версия)
- Количество оценок: 14

- Рейтинг: 3,4 звезды
- Целевые пользователи: новички, любители активного отдыха

Trio — отличный инструмент для использования вашего смартфона в качестве 3d сканера. Вы просто нажимаете кнопку камеры в центре экрана и идете вокруг объекта. Экран добавляет синюю точку дополненной реальности (AR) каждый раз, когда он делает снимок. Как только у вас будет достаточно фотографий, просто нажмите и удерживайте середину экрана, затем он начнет склеивать их. Пока вы в объекте, который вы сканируете, имеет много текстур, сканирование обычно получается хорошо.

Приложение также будет сканировать объекты вокруг цели, а это значит, что вам придется немного ретушировать 3d объект. Надежность также может быть небольшой проблемой, вам придется выбирать, так как некоторые сканы оказываются лучше, чем другие.

В качестве дополнительной функции Trio имеет своего рода социальную платформу. Вы можете следить за другими пользователями, просматривать другие сканы и добавлять друзей. Интересно посмотреть избранные сканы и посмотреть, как получились сканы других людей. А благодаря функции приложения «Экспорт в Sketchfab» вы можете загружать сканы на веб-сайт Sketchfab.

Scann3D.

Особенности:

- Стоимость: бесплатно, но требуется подписка, если вы хотите экспортировать модели
- Платформы: Android (5.0 и выше)
- Число оценок: 3 262
- Рейтинг: 2,9 звезды
- Целевые пользователи: начинающие, новички

В целом, Scann3D, от SmartMobileVison, является определенным первопроходцем. С хорошо видимыми точками отслеживания, возможностью импорта изображений и экспорта в Sketchfab Scann3D выглядит хорошо. Приложение очень чистое, простое в использовании и в целом обеспечивает хороший опыт. Это функция «управляемого сканирования», которая помогает убедиться, что ваши фотографии хороши и это действительно помогает.

Иногда то, что может разочаровывать, заключается в том, что приложению требуется много времени для визуализации модели. Кроме того, во время тестирования приложение зависало во время рендеринга фотографий. Еще одно разочарование в том, что вы не можете экспортировать модели без подписки на их функции.

Это приложение 3D-сканера было действительно продумано, и легко понять, почему Scann3D хочет монетизировать свою технологию. Тем не менее, как и в случае с Qlone, это может быть лучший способ монетизации.

Scarry.

Особенности:

- Стоимость: бесплатно
- Платформы: iOS (11.0 или более поздняя версия)
- Количество оценок: 28
- Рейтинг: 3,9 звезды
- Целевые пользователи: рассказчики или создатели AR / VR, новички

Scarry, от Scandy, — это скорее социальная сеть отсканированных произведений, чем что-либо еще, без возможности экспортировать. Внутри приложения вы можете просматривать сканы других людей в AR, где и когда угодно.

Если у вас есть iPhone 10, вы можете использовать фронтальную камеру для сканирования объектов. Приложение очень простое в использовании, а также эстетично. Все абсолютно бесплатно, так что вы можете сканировать все, что вы хотите.

Одним из недостатков является то, что вы можете сканировать только в течение десяти секунд, но, поскольку у приложения нет другой цели, кроме как просматривать и обмениваться моделями, этого более чем достаточно. В общем, если вы хотите хорошее экспортное сканирование, это не приложение для 3D-сканера.

Heges.

Особенности:

- Стоимость: бесплатно
- Платформа: iOS (12.0 или более поздняя версия)
- Количество оценок: 64
- Рейтинг: 3,4 звезды
- Целевые пользователи: Профессионалы

Heges был запущен в 2018 году и предназначен для iPhone серии X (iPhone X, XS, XR), который поставляется с камерой TrueDepth. Приложение имеет пакет сканера, который стоит \$ 2,99 и может сканировать с различной точностью, с возможностью экспорта 3D-моделей в файлы PLY и STL. Heges также фиксирует цвет и имеет «ночной режим», который позволяет пользователю сканировать в очень темной среде. После переключения на пассивное ночное видение нет никаких ограничений по дальности действия сканера.

Во время сканирования вы можете поделиться экраном с другим устройством Apple, если на другом устройстве установлена камера TrueDepth или вы можете установить Heges. Но если совместное использование экрана является проблемой, вы можете использовать этот держатель зеркала от пользователя 3dpeteuk Thingiverse, чтобы крепить зеркало перед камерой, чтобы видеть то, что вы сканируете. Эндрю Райли также предлагает вращающийся 3D-сканер для более удобного вращения на 360 °.

В Heges появилась новая функция «Бесконечное сканирование», которая позволяет сканировать бесконечно большие пространства, единственное ограничение — это место на вашем телефоне. Приложение даст вам облака точек с высоким разрешением и на первый взгляд может показаться сложным в использовании, но оно станет проще, когда вы освоите его.

Одним из ограничений Heges является то, что сканер может выйти из строя, когда вы начинаете двигаться слишком быстро или когда вы пытаетесь сканировать сложную среду, например стеклянную поверхность. Но это незначительная деталь, для приложения, которое позволяет просматривать ваши модели в AR.

Sony 3D Creator.

Особенности:

- Стоимость: бесплатно
- Платформа: Android (8.0 и выше)
- Количество оценок: 1,870
- Рейтинг: 4,3 звезды
- Целевые пользователи: начинающие, новички

3D Creator может превращать объекты и людей в 3D-модели с высоким разрешением и в зависимости от того, что вы хотите сканировать, приложение поможет вам добиться отличного результата, поскольку оно имеет различные режимы сканирования, а именно: еда, голова, лицо, селфи и свобода, Раньше приложение было эксклюзивным для устройств Xperia, но Sony сделала его доступным и для других устройств Android.

Приложение Sony 3D Creator дает вам свободу создавать 3D-модели вашего лица с помощью фронтальной камеры и если хотите, вы можете поделиться своей моделью в социальных сетях или распечатать ее дома.

«Обработка после сканирования в облаке» позволяет визуализировать 3D-модели с разрешением 4K, что позволяет повысить детализацию и реалистичность. Сканер также имеет эффекты AR, которые позволяют вам воплотить ваши сканы в 3D-аватары. Если вы

недовольны своими моделями, вы можете улучшить их, используя обрезку и настройку фотографий в приложении. Или вы можете улучшить качество ваших сканов, загрузив их на серверы Sony.

Capture.

Особенности:

- Стоимость: бесплатно
- Платформа: iOS (12.0 или более поздняя версия)
- Количество оценок: 92
- Рейтинг: 4.2 звезды
- Целевые пользователи: новички, эксперты

Вы можете использовать Capture для 3D-сканирования, которым можно поделиться с друзьями или сохранить и загрузить в формате файла по вашему выбору. Для приложения требуется камера TrueDepth, которая поставляется с iPhone серии X (iPhone X, Xs, Xr) и позволяет отправлять результаты сканирования через iMessage, WhatsApp, Slack и многие другие приложения. Ключ в том, что любой iPhone может отображать скан, даже если в нем отсутствует камера TrueDepth.

Сканирование с помощью Capture похоже на панорамное фото (Рисунок 6.23). Вы можете предварительно просмотреть сканирование в модельной среде приложения или поместить его в AR. Это приложение имеет платформу, где вы можете зарегистрироваться для бесплатной учетной записи и сохранять или просматривать свои сканы. С этой же платформы вы можете скачать файл в формате, который соответствует вашим потребностям.

Capture использует камеры и датчики iPhone и функционирует, создавая «облако точек», позволяя измерять глубину сканируемого объекта. Затем приложение обрабатывает собранную информацию для создания 3D-моделей.

Основным ограничением этого приложения является то, что вы можете использовать его только на фронтальной камере. Поэтому вы должны держать телефон в неудобном положении, когда хотите отсканировать объект. Кроме того, всякий раз, когда что-то идет не так, например, когда вы останавливаетесь или двигаетесь слишком медленно, приложение преждевременно прекращает сканирование.

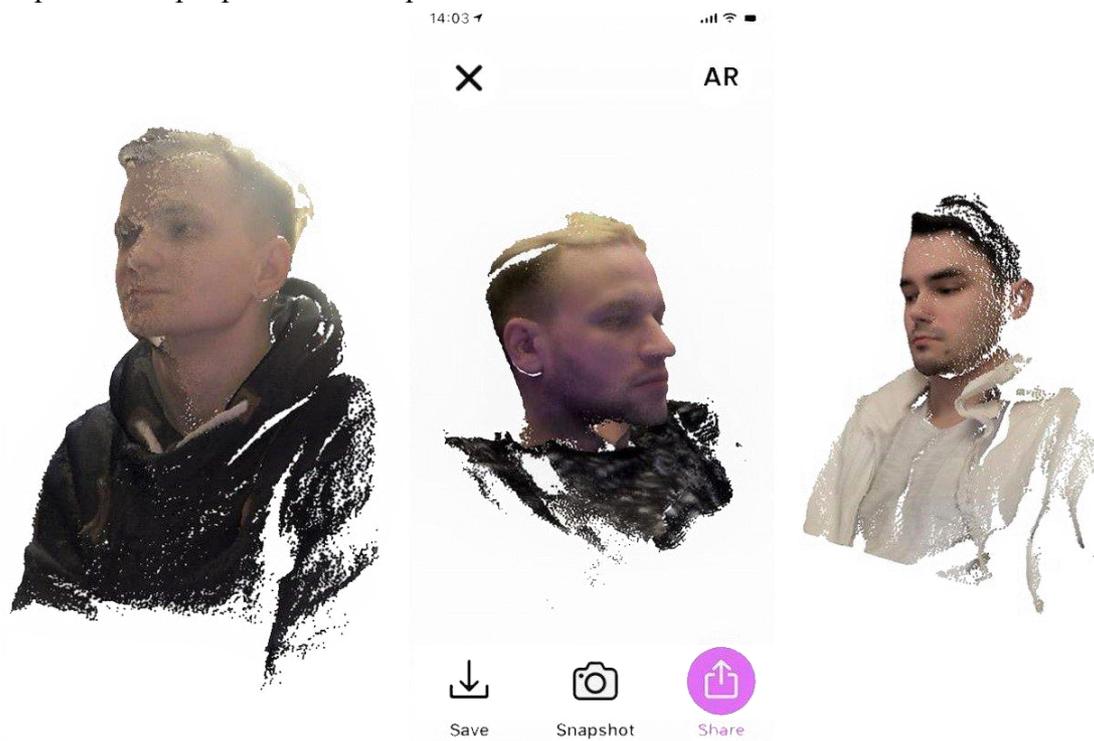


Рисунок 6.23 Capture

6.3 Программное обеспечение для 3D моделирования

Наиболее важное решение необходимо сделать на этапе выбора САПР. Вариантов много, но в основном САПР делятся на твердые, скульптурные, параметрические и полигональные [41-44].

Программы твердого моделирования используют метод, называемый «конструктивная блочная геометрия (CSG)» или аналогичные технологии, позволяя создавать сложные 3D-формы. Популярные бесплатные программы этого вида: *SketchUp*, *Autodesk 123D* и *Tinkercad* (которая не требует установки и может работать прямо в окне Вашего браузера). В твердотельном моделировании простые формы, такие как коробки, цилиндры и пирамиды, используются для создания более сложных форм, зачастую с применением логических операций. Например, пустую коробку может быть смоделирована при помощи двух кубов разных размеров и «вычитанием» из большего меньшего.

У программ твердотельного моделирования есть три основных преимущества. Во-первых, сам процесс моделирования, как правило, более интуитивен, и чаще всего становится самым простым для новичков. Во-вторых, интерфейс позволяет легко установить точные измерения между объектами, что удобно для создания механических частей. В-третьих, программное обеспечение обрабатывает большинство вопросов, связанных с обеспечением целостности («герметичности»), несмотря на множество операций, которые осуществляются для создания сложных форм.

Скульптурные программы моделирования, такие как *ZBrush*, *Sculptris* и *Autodesk Mudbox*, позволяют использовать более свободный интерфейс, резать, тянуть, скручивать и нажимать на поверхность «пузыря», приводя ее в нужную форму. Это отлично подходит для формирования органических поверхностей, таких как лица и фигуры, но менее пригодны для точных деталей и плоских поверхностей. Отличный инструмент для начинающих — *Sculptris*, а также его младший, но дорогой брат — *ZBrush*. (Многие полигональные модельеры, такие как *Blender*, *Modo* и *Maya* могут предложить встроенные инструменты для скульптурного моделирования)

Параметрические программы моделирования, такие как *3ds Max*, довольно уникальны, так как вместо рисования фигур мышью, используются простые программы, описывающие фигуры и их различные комбинации. Такой способ идеально подходит для создания технических моделей, таких как корпуса, механизмы, так как позволяет точно задавать их габариты. С другой стороны, параметрические модельеры также будут интересны для Процедурального творчества. Такие инструменты как *Marius Watz's ModelBuilder* и *Grasshopper* ориентированы на абстрактные формы, путем создания из данных и математических формул. Например, модели вроде нервной системы и других комплексных органов невозможно создать вручную.

Полигональные программы моделирования представляют собой объекты, созданные при помощи тысячи мелких треугольников, объединенных вместе по всей модели поверхности. Наиболее известные примеры таких программ: *Blender*, *3ds Max*, *Maya* и *Modo*. Они отлично подходят для создания 3D графики и анимации, но требуют особого подхода при 3D печати. Необходимо быть уверенным в полноте модели, иначе от печати вообще придется отказаться.

Полигональные программы моделирования зачастую предлагают огромные возможности для создания моделей, но в тоже время требуют изучения. Чтобы моделирование было эффективным, необходимо освоить множество порой нелогичных принципов, вроде работы с «каре» (вместо треугольников и n-угольников), разработка «край-потолок» для быстрого манипулирования моделями, и использования подраздела «инструменты автоматического сглаживания неровностей и поверхностей органических форм».

Подготовить эффектный рекламный ролик, сконструировать проект интерьера, создать

анимацию для приложения или просто яркую презентацию — всё это позволяет делать 3D-графика. Чтобы создать качественную объемную визуализацию, понадобятся специальные программы. Ниже перечислены наиболее популярные программы для 3D-моделирования. Они подойдут как новичкам — например, для быстрой визуализации своего дизайна интерьера, так и продвинутым специалистам, которые хотят отрисовать видео с максимальной реалистичностью.

Таблица 6.3 Характеристики и условий использования программ

Название	Русский язык	Цена	Лицензия	Операционная система	Форматы
Blender	да	0 \$	бесплатно	macOS, Windows, Linux, Steam	3ds, dae, fbx, dxf, obj, x, lwo, svg, ply, stl, vrlm
SketchUp	да	299 \$/год	пробная	macOS, Windows	stl, dvg, dxf, 3ds, jpeg, png, bmp
TinkerCAD	нет	0 \$	бесплатно	онлайн	tl, obj, x3d, vrlm, svg
AutoCAD	да	1090 \$/год	пробная	Windows, OS x, iOS, Android, Windows Phone	dxf, dwg, fbx, pdf, 3ds, 3dm, step
Maya	нет	4375 \$/3 года	пробная	macOS, Windows, Linux	ai, aiff, dae, dxf, dwg, eps, fbx, maya, mel, obj, stl
3Ds Max	да	1040 \$/год	пробная	macOS, Windows, Linux	stl, 3ds, ai, abc, ase, asm, dem, dwg, dxf, dwf, flt, iges, ipt, jt, nx, obj, pri, prt, rvt, sat, skp, stp, vrlm
Cinema 4D	да	3495 \$/вечно	пробная	macOS, Windows	3ds, dae, dem, dxf, dwg, fbx, iges, skp, stl, wrl, obj
ZBrush	нет	895 \$/вечно	пробная	macOS, Windows	obj, dxf, psd, tif, jpg, bmp
ArchiCAD	да	1440 \$/год	пробная	macOS, Windows	dwg, dxf, 3ds, stl, png, pdf
FreeCAD	да	0 \$	бесплатно	macOS, Windows, Linux	obj, dwg, stl, dxf, step, dae, csg, svg, iges, stel
SolidWorks	да	1168 \$/год	пробная	Windows	obj, stl, off, ply, ply2, 3mf, cgr, 3ds, wrl, xyz

Выбирать программу для изучения стоит по своему уровню:

Начальный уровень

- Autodesk TinkerCAD
- DesignSpark Mechanical
- SketchUp
- FreeCAD

Продвинутый уровень

- Autodesk AutoCAD
- Cinema 4D
- ZBrush
- Blender
- SolidWorks

Для профессионалов

- Autodesk 3ds Max
- Autodesk Maya

На что следует обратить внимание при выборе программ для 3D-моделирования?

ПО — не главная составляющая успеха дизайнера: на первом месте навыки и образование. Но начинающим дизайнерам неудобная и сложная программа может отбить желание работать и развиваться, поэтому выбирать надо внимательно.

На что обратить внимание при выборе:

- удобство использования,
- возможности и функционал,

TinkerCAD позволяет создавать детализированные 3D-модели, используя базовые формы, соединяя их вместе. Процесс обучения намного проще, чем в других программах. Она идеально подходит для новичков и детей, для обучения детей 3D-печати. Ее чаще других используют в школах и классах по всему миру. Можете начать работу за считанные минуты в браузере без загрузки. Более того, можно скачать приложение TinkerCAD и поиграть с моделями на смартфоне или планшете!

Autodesk производит множество программ для различных отраслей. TinkerCAD идеально подходит для начинающих в 3D-дизайне, позволяет сделать что-то классное. Вы можете экспортировать модель в STL и любом другом формате и отправить на печать на 3D-принтере. Как только вы приобретете необходимый опыт, вам может понадобиться более сложная программа, например AutoCAD. Но при этом TinkerCAD остается отличной программой для начала вашей карьеры 3D-дизайнера.

DesignSpark Mechanical.

Назначение: моделирование инженерных конструкций.

Стоимость: бесплатно.

Mechanical ориентирован в первую очередь на начинающих специалистов и просто любителей в части 3D моделирования (Рисунок 6.25).

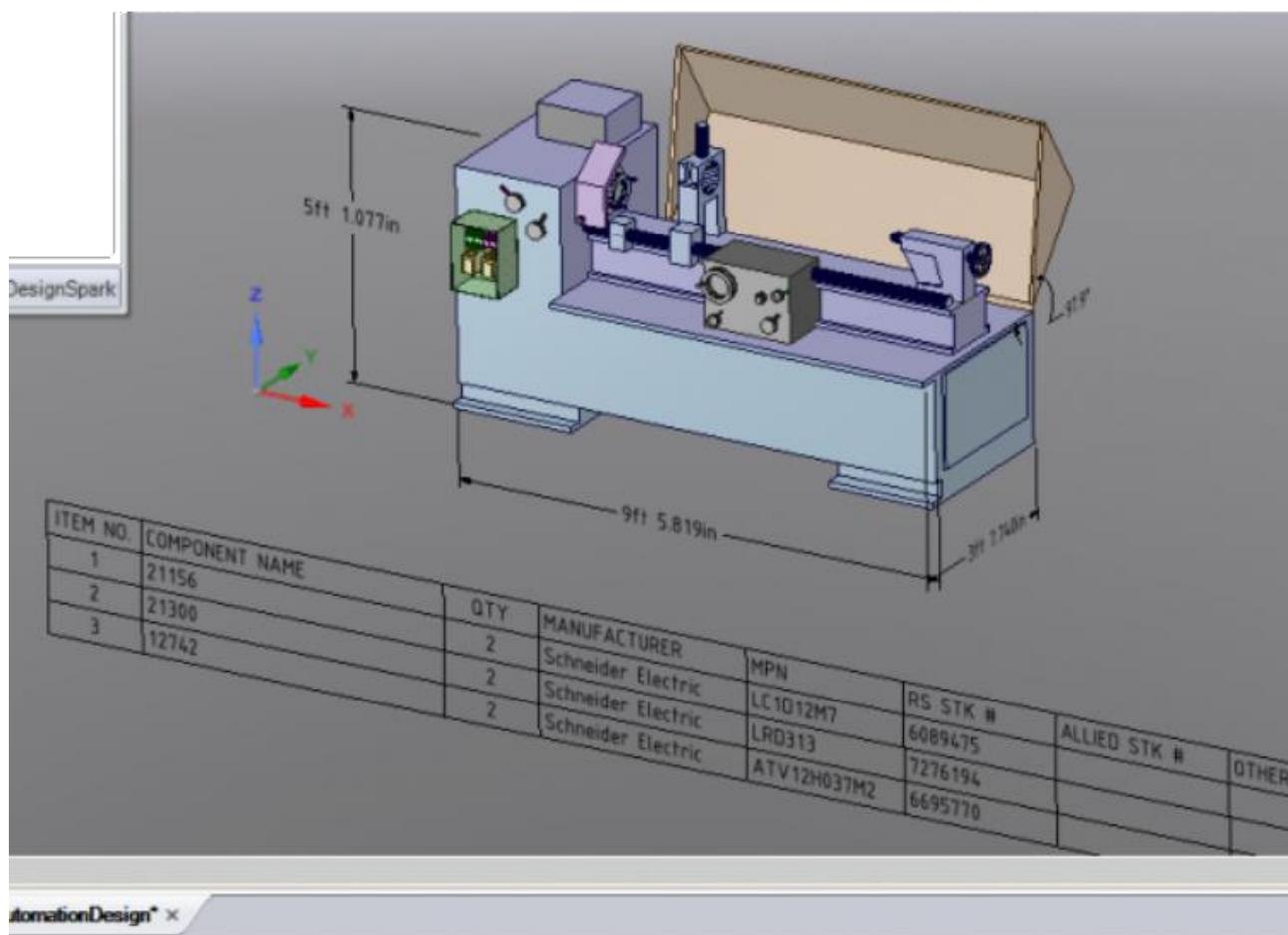


Рисунок 6.25 DesignSpark Mechanical

Возможности по сравнению с AutoCAD куда скромнее, зато бесплатно, и эффективно — без труда можно создать почти любую объёмную деталь для дальнейшего использования в более сложных композициях или отправки на 3D-печать. О сложных текстурах и динамическом представлении здесь речи не идёт, но техническим специалистам они особо и не нужны.

SketchUp

Назначение: быстрая визуализация архитектурных идей.

Стоимость: Основная версия бесплатная, версия Pro стоит \$299 в год.

Страна разработчика – США.

Плюсы:

- бесплатные обучающие материалы на русском,
- простой интерфейс,
- подходит дизайнерам и архитекторам,
- много инструментов и плагинов доступно бесплатно,
- можно докупить только то, что нужно,
- в некоммерческих целях можно использовать бесплатно.

Минусы:

- программа может выдавать ошибки,
- нельзя открыть проекты в более ранних версиях,
- чтобы выгрузить файлы в расширения OBJ и STL, нужно установить плагины.

Программа - ветеран индустрии программного обеспечения для 3D-моделирования, была создана в 2000 году компанией Lastsoftware (Рисунок 6.26). В 2006 году ее выкупил Google, чтобы внедрить этот универсальный и мощный инструмент в свои сервисы. С тех пор она была продана Trimble Inc., которая и предложила бесплатную версию. SketchUp - отличный выбор для начинающих дизайнеров. Ее, как и TinkerCAD, освоить легче, чем большинство других 3D-программ. Содержит практически все инструменты, которые могут понадобиться.



Рисунок 6.26 SketchUp

Несмотря на то, что SketchUp пользуются в основном архитекторы, она приобретает все большую популярность в 3D-печати. Инструменты удивительно хорошо подходят создателям 3D-CAD-файлов. Вы можете загрузить расширение SketchUp STL, чтобы создавать файлы в STL.

SketchUp имеет простой интерфейс, не перегруженный информацией. Вы можете легко

разобраться в нем за несколько часов и в первый же день создать очень реалистичную 3D-модель.

FreeCAD — бесплатная программа с открытым исходным кодом.

Назначение: моделирование деталей и конструкций.

Стоимость: бесплатно.

Плюсы:

- бесплатно,
- открытый код,
- программу можно дорабатывать самому благодаря открытому коду,
- понятный интерфейс и быстрая проработка деталей.

Минусы:

- не все умеют программировать и не всем это нужно,
- в системе автоматического проектирования не хватает функций,
- нужно использовать дополнительные программы для решения усложнённых задач.

FreeCAD была выпущена еще в 2002 году, и несмотря на то, что все еще находится в стадии бета-тестирования, ее разработка значительно продвинулась. Она предназначена для того, чтобы сделать процесс создания 3D-версий реальных объектов максимально эффективным и простым.

Очень полезная функция - возможность начать со статического 2D-эскиза, из которого затем можно построить конечную 3D-модель. FreeCAD хорошо работает в Windows и Mac, можно легко экспортировать модель в виде файлов STL, OBJ или даже DXF, например, для ЧПУ.

Хотя FreeCAD была разработана в основном для станков, ее можно использовать и для 3D-печати (Рисунок 6.27). Более того, FreeCAD - программа с открытым исходным кодом, поэтому можно работать с Python.

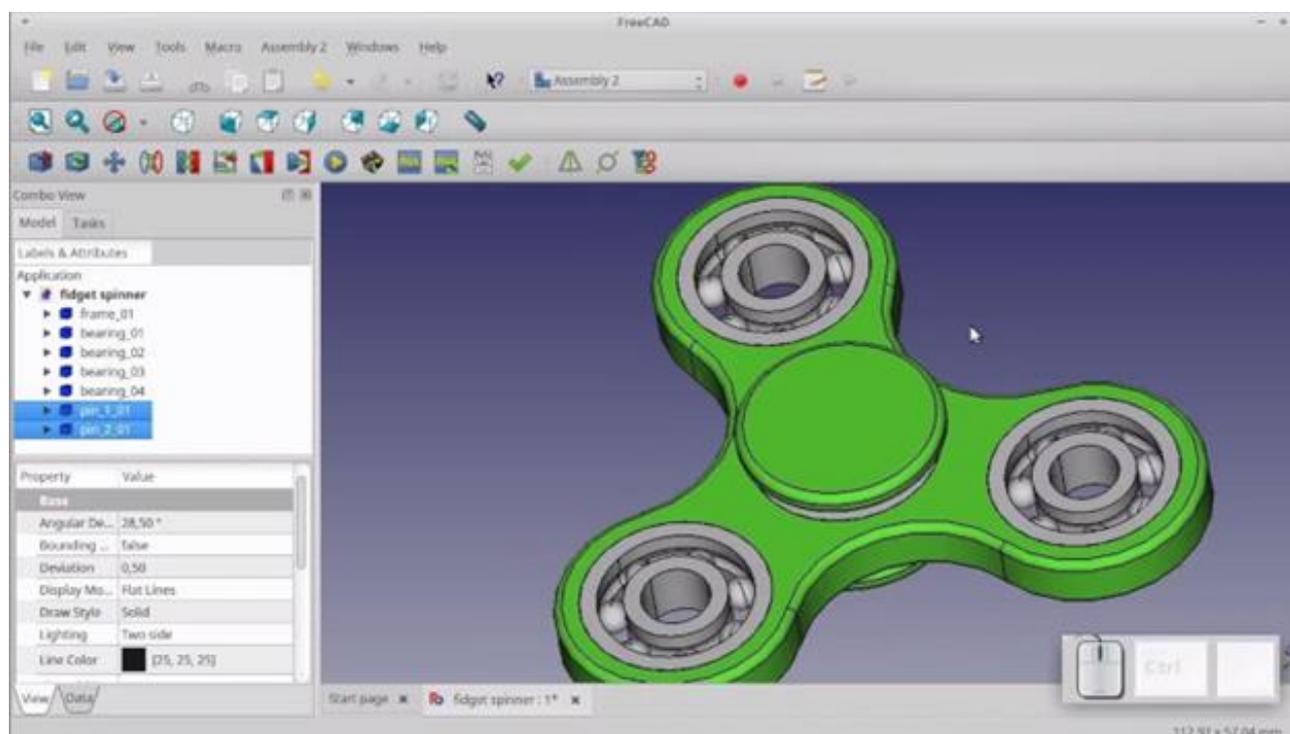


Рисунок 6.27 FreeCAD

FreeCAD идеально подходит для пользователей с некоторым опытом проектирования, так как часть инструментов может оказаться сложной для начинающих. Но в целом это

очень мощный бесплатный инструмент для 3D-моделирования.

6.3.2. Программное обеспечение продвинутого уровня

Autodesk AutoCAD.

Назначение: моделирование инженерных конструкций.

Стоимость: от 10250 рублей в месяц. Есть бесплатная трехгодичная студенческая лицензия.

Плюсы:

- в интернете много обучающих материалов и готовых чертежей,
- возможность передачи материалов в другие программы линейки Autodesk,
- можно моделировать для 3D-принтеров,
- высокий уровень визуализации,
- большая библиотека готовых элементов.

Минусы:

- дорого,
- функционал не успевают обновлять под потребности пользователей,
- сложно привязать данные к чертежу.

Программа, изначально создана под создание двухмерных инженерных чертежей, сегодня имеет очень мощные возможности для 3D-моделирования (Рисунок 6.28). Во всяком случае, это касается всего за пределами конечной визуализации и наложения текстур. Будь то техническая деталь с множеством маленьких элементов или модель огромного здания — AutoCAD справится одинаково хорошо. Поэтому работникам технических специальностей освоить эту программу надо едва ли не в обязательном порядке. Также он будет полезен для работы с 3D-печатью или резкой.

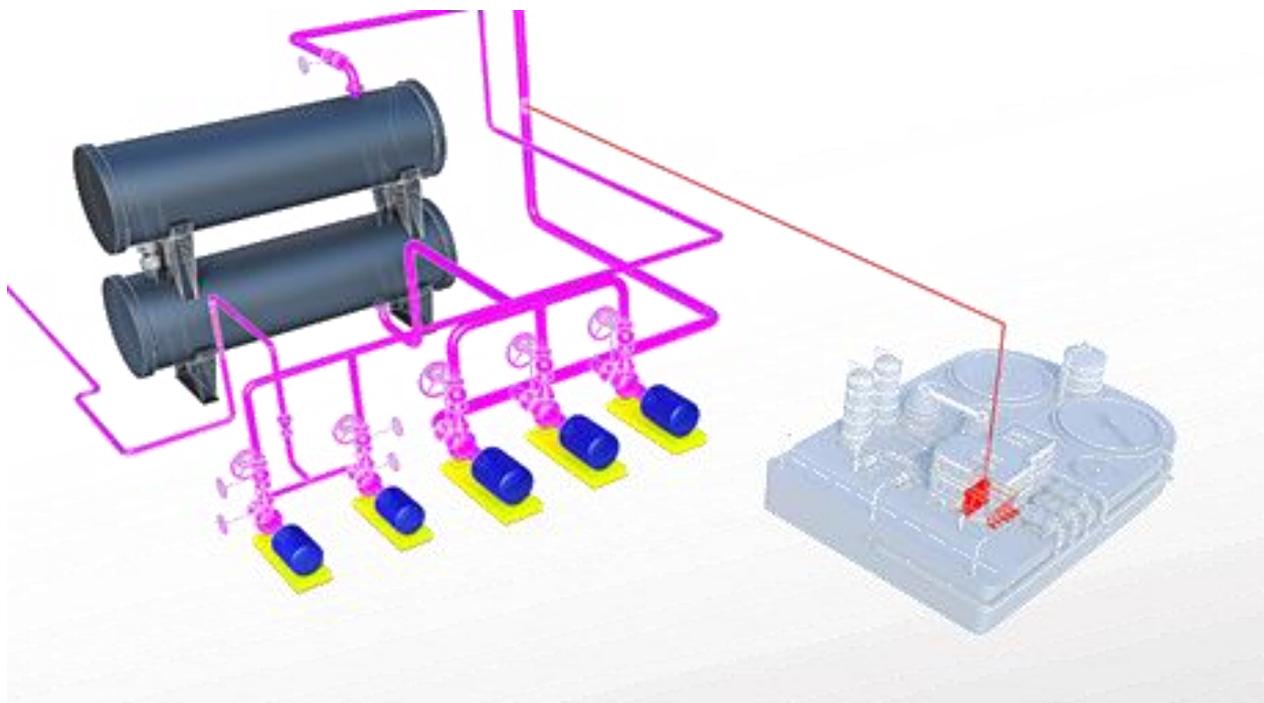


Рисунок 6.28 Autodesk AutoCAD

Cinema 4D.

Назначение: графическая визуализация сцен.

Стоимость: от 5350 рублей в месяц.

Плюсы:

- понятный интерфейс,
- можно работать с абстрактными и реальными моделями,
- много обучающих материалов в свободном доступе,
- развитое комьюнити,
- есть система помощи и подсказок для новичков,
- работа в связке с Adobe After Effects даёт практически безграничные возможности.

Минусы:

- дорого,
- возможны сложности в освоении спецэффектов,
- версии редактора могут конфликтовать между собой,
- нет встроенных библиотек.

Несмотря на простой интерфейс Cinema4D имеет достаточно широкие возможности по скульптурированию, рендерингу, созданию текстур и эффектов в анимации (Рисунок 6.29). Плюс здесь есть целый ряд инструментов, призванных упростить и ускорить процесс создания сцен. При этом не стоит думать, что с программой справится любой пользователь — опыт хотя бы базового 3D моделирования крайне необходим, да и сцены сами себя не построят.



Рисунок 6.29 Cinema 4D

ZBrush.

Назначение: скульптурирование моделей.

Стоимость: от 40 долларов в месяц.

Плюсы:

- известность среди заказчиков и исполнителей,
- подход к моделированию как к лепке,
- низкие системные требования при установке,
- взаимодействует с полигональной сеткой косвенно, а не напрямую,
- можно настроить под себя.

Минусы:

- дорого,
- сложно освоить,

- нужно разбираться в анатомии и скульптуре,
- рендер и палитра — лучше использовать дополнительное ПО.

Все, кто в реальном мире любит возиться с глиной и гипсом, от работы с ZBrush получают колоссальное удовольствие. Здесь точно также основная область творчества лежит в области скульптурирования (Рисунок 6.30). После получения желаемых очертаний лица или тела, программа поможет вам добавить нужные текстуры, блики и тени для достижения финального результата. Работать с ZBrush настолько комфортно, что можно его воспринимать не только, как профессиональный инструмент, но и полноценное развлечение. Посетив любое из многочисленных сообществ программы вы сами в этом убедитесь.

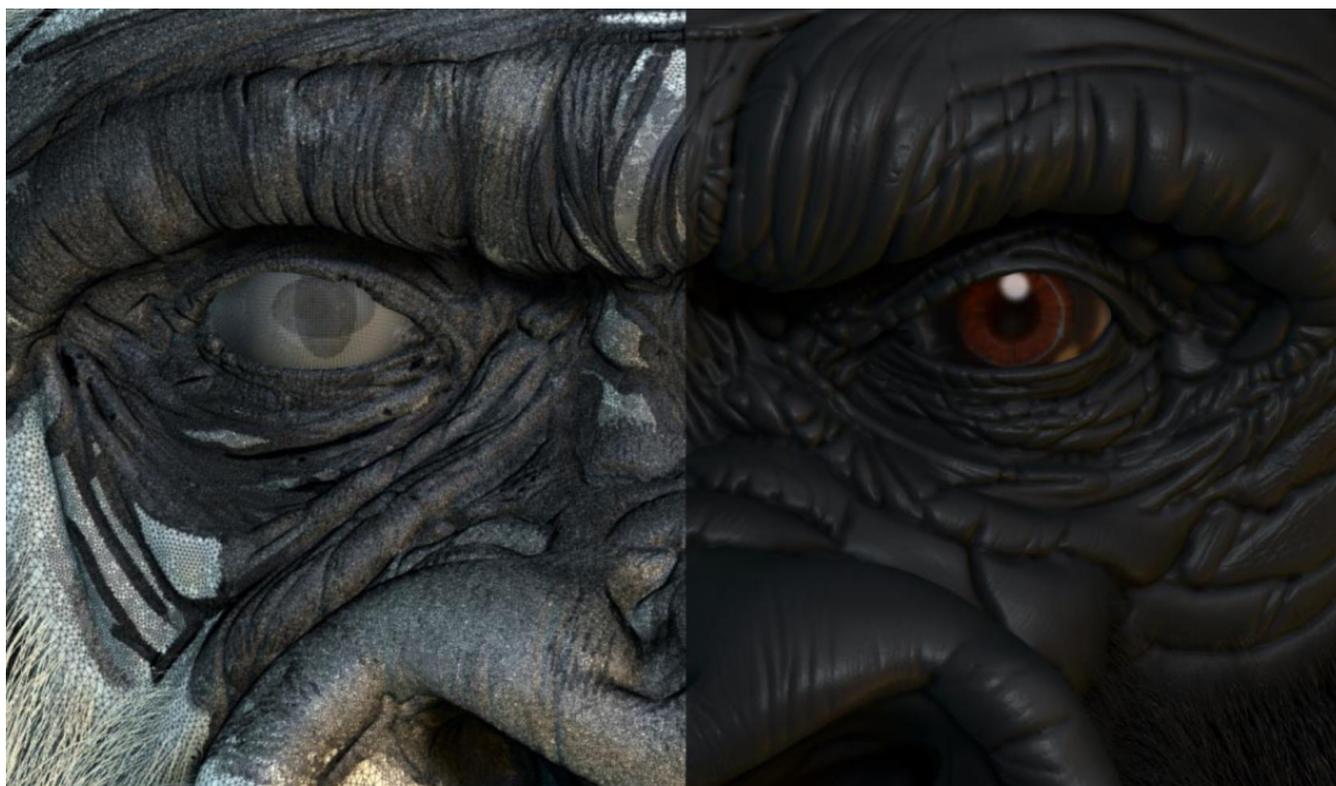


Рисунок 6.30 ZBrush

Blender — расширенная бесплатная программа.

Назначение: скульптурирование моделей и анимация.

Стоимость: бесплатно.

Страна разработчика – Нидерланды.

Плюсы:

- бесплатно,
- создание, текстурирование и анимирование 3D-моделей,
- можно создать макет для 3D-принтера,
- отрисовка изображений в 2D,
- мало весит — 150 мб,
- есть сплочённое комьюнити.

Минусы:

- нереалистичность персонажей,
- мало библиотек моделей,
- сложно проработать мелкие детали,
- у новичка могут быть трудности с освоением.

Возможно, это самое популярное программное обеспечение для 3D-дизайна. Blender

имеет огромное активное сообщество, которое делится своими STL-файлами и 3D-моделями, а также информацией в интернете. Быстрый поиск Google и YouTube выдаст тысячи ссылок, где пользователи демонстрируют свои 3D-проекты и обмениваются опытом работы в Blender 3D (Рисунок 6.31). Такая популярность обусловлена прежде всего тем, что программа на 100% бесплатная и с открытым исходным кодом. В ней можно создать практически все, что угодно. Выбор инструментов огромен.

Процесс обучения более сложный, чем у предыдущих программ. Однако благодаря своему набору инструментов Blender универсальная программа для 3D-моделирования. Она используется в различных областях, начиная от создания VFX для фильмов, видеоигр, дизайна 3D-моделей, заканчивая 3D-печатью. Кроме того, Blender поставляется с интегрированным игровым движком, а также детализированными инструментами для моделирования и возможностью редактирования видео. Это невероятное бесплатное программное обеспечение идеально подходит для разработчиков игр и опытных 3D-моделистов.

Здесь есть инструменты для создания качественных 3D-моделей, наложения на них текстур, в том числе волос и тканей, дальнейшей анимации и постобработки видео. И всё это запаковано в менее 200 мегабайт пространства. При этом, как и любой крупный проект с открытым кодом, Blender имеет мощное сообщество и постоянно обрывает всё новыми возможностями.



Рисунок 6.31 Blender

SolidWorks.

Плюсы:

- понятный интерфейс,
- обменивается данными с продуктами Windows,
- есть большая библиотека стандартных изделий,
- можно создать презентационный ролик изделия в SolidWorks Animator.

Минусы:

- дорого,
- работает только на Windows,

- узкоспециализированная программа.

Эту программу используют те, кто работает с промышленным производством, машиностроением, конструированием и т. п. Софт адаптирован для русскоговорящих. Можно проводить симуляции и тесты созданных моделей.

6.3.3. ПО для профессионалов

Autodesk 3ds Max.

Назначение: создание качественных графических 3D-моделей.

Требуемый уровень подготовки: профессионал.

Стоимость: от 9790 рублей в месяц.

Плюсы:

- есть бесплатная версия для студентов,
- встроенный V-Ray — система рендеринга,
- много обучающих материалов в свободном доступе,
- можно смоделировать разные погодные условия с помощью специальной утилиты.

Минусы:

- дорого, если оплачивать полную версию программы,
- не хватает функционала для создания мультфильмов,
- не удобно скульптурировать людей и животных.

Пожалуй, одна из наиболее мощных программ для 3D моделирования, используемая повсеместно: в играх, киноиндустрии, архитектуре, интерьере и ландшафтном дизайне, презентациях любых продуктов (Рисунок 6.32).



Рисунок 6.32 Autodesk 3ds Max

Здесь на высочайшем уровне реализованы возможности обработки текстур, рендеринга, трассировки лучей, взаимодействия объектов, что позволяет реализовать задумки любой сложности. Строго рекомендуется для всех специалистов, кто отвечает за визуальное представление объектов, как в статике, так и динамике.

Autodesk Maya.

Назначение: графическая визуализация сцен.

Требуемый уровень подготовки: профессионал.

Стоимость: от 9800 рублей в месяц.

Плюсы:

- есть бесплатная версия для студентов,
- широкий функционал для анимации,
- много обучающих материалов и развитое комьюнити пользователей,
- можно создавать спецэффекты,
- большая библиотека готовых элементов.

Минусы:

- нужен мощный компьютер для бесперебойной работы программы,
- новичку сложно разобраться,
- не удобно детализировать скульптинг.

Maya идеально подойдёт для всех, кому предстоит создавать отрисовать сюжеты с максимальной реалистичностью, то есть представителям кино, мультипликации и игр (Рисунок 6.33). Возможности для создания эффектов здесь ограничены только вашей фантазией.



Рисунок 6.33 Autodesk Maya

К примеру, используя только встроенные модули, вы сможете реализовать взаимодействие ветра, дождя, тканей, взрывов, волос и много другого. Одновременно и в одной сцене. Разумеется, для этого придётся потратить много времени на обучение Maya и грамотное планирование сцен, но это того стоит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, осталось рассмотреть только 3D технологии будущего. К ним относятся различные футуристичные сценарии, которые в той или иной мере начинают развиваться уже сегодня. К ним можно отнести методику виртуальной реальности, 3D сканирование для создания идеальной одежды и обуви, 3D-печатный макияж и прочее. В некотором роде, 3D технологии будущего включают в себя также биопечать. Кстати, ученые ведут разговоры о строительстве первого 3D-печатного поселения на Луне и Марсе, так что перспективы 3D печати также актуальны за пределами Земли.

3D-печать сегодня находит применение практически во всех сферах. Эксперты оценили, как могли бы развиваться эти технологии в промышленности [45].

Killer app, или «убойное приложение» – специалисты утверждают, что именно это необходимо для удачной реализации технологии. Аддитивное производство использует методику создания образцов.

Разница между тем, что было ранее, и тем, что есть сейчас, – в использовании прототипов на производстве. Массово практикуется внедрение печатных образцов для опытов. Но технологии находятся в постоянном развитии, и следующий шаг – создание моделей-трафаретов, служащих основой для изготовления деталей.



Владимир Кузнецов – руководитель FabLab. Его лаборатория цифрового производства успешно работает с 2012 года и сотрудничает с Массачусетским технологическим институтом. Он отмечает, что модель, которая создается с использованием технологий трехмерной печати, пригодна для работы и как инструмент, и как шаблон для создания инструмента. Этот способ может быть столь эффективным, что позволит отказаться от традиционных методик производства.

Кузнецов, тем не менее, говорит, что сегодня 3D-печать значительно упрощает изготовление сложных по геометрии моделей, однако массового распространения пока ожидать не приходится.



Сергей Богданов, исполнительный директор Регионального центра инноваций StartupSamara и оператор трека Aerospace GenerationS, имеет более оптимистические взгляды. По его мнению, широкое распространение технологии получат менее чем через 5 лет. Плюсы применения данного метода – в удобстве использования и возможности изготавливать нетипичные детали, создать которые традиционным способом литья или каким-либо другим нельзя.

Дальнейший шаг в производстве – применение rapid manufacturing. Этот термин подразумевает создание готового к использованию продукта.

Первоначально из-за высокой себестоимости создавались только те изделия, в которые было оправдано вложить крупную сумму – например, скафандры космонавтов, сделанные по индивидуальным параметрам. Но стоимость 3D-печати постепенно уменьшается, появляется возможность конкурировать с традиционными методиками.

Владимир Кузнецов считает, что применения 3D-принтинговых технологий в массовом производстве ожидать не стоит. Но вот использование методики аддитивной печати в качестве средства предсерийного и малосерийного производства реально.

Эксперты единогласно утверждают, что 3D-технологии создают новый рынок, и он расширяется минимум на 30% в год.

Сергей Богданов называет проблему использования методов передовой печати достаточно жёсткой, ведь если не успеть внедрить ее сейчас, есть шанс отстать навсегда. На

сегодняшний день вопрос состоит не в производстве принтера – многие специалисты заняты в сфере производства материалов и разработке программного обеспечения.

3D в России.

Ситуация в России выглядит так: команды разработчиков постоянно ищут площадки для реализации проектов, а предприятия постоянно заняты поиском выгодных стартапов. И у них есть возможность встретиться.



Дмитрий Карелин, заместитель генерального конструктора НПО «Сатурн» (разработчик и производитель авиационных двигателей), считает, что использование деталей в готовом продукте возможно, но происходить это должно по принципу «от простых к сложным». Для начала тестируется работа на несложных компонентах. Это могут быть кронштейны и форсунки, а также завихрители и прочие детали.

Для предприятия «Сатурн» на данный момент оказались интересны три стартапа, которые были отобраны благодаря участию в

GenerationS.

Компания заинтересована в отработке технологических характеристик лазерного синтеза, поэтому ведется активное сотрудничество с российскими компаниями, исследования физико-химических свойств материалов, испытания их прочности и другие.



Анна Князева, Томский политехнический университет, проект «Моделирование синтеза новых материалов в SLM и EBM технологиях».

В настоящее время фактическое трехмерное производство в России отсутствует. Есть ряд предприятий с недорогими принтерами, которые изготавливают несложные детали. Весной 2015-го Томский политехнический университет открыл научно-образовательный центр, оборудование в котором собрано на собственном производстве. Этот проект получил название

«Современные производственные технологии».

Здесь стало возможно создавать детали для атомной промышленности, авиационной и космической отраслей, печатать готовые объекты для медицины.

Центр способствовал открытию стартапа, основные направления деятельности которого – математическое моделирование и программы инженерного направления. Стартап стремится сделать оптимизационные эксперименты менее дорогостоящими.

Наиль Якупов, проект PolyWax.



Металлические изделия, в том числе и множество авиадвигателей, создается методом литья по выплавляемым образцам. Изготавливается восковая модель, которая покрывается керамической формой. Воск расплавляется, а керамика погружается в металл.

Создание восковых образцов возможно различными способами, но наиболее часто встречается запрессовка в соответствующие пресс-формы. Это методика длительная и дорогостоящая. Когда требуется партия мелкосерийного производства, возрастает себестоимость моделей.

Проект PolyWax предлагает создание более дешевых восковых образцов. Такие модели могут пригодиться для индивидуальных заказов, в работе над уникальными изделиями.

Если для авиадвигателя необходимо в среднем 5–40 прототипов, то на их изготовление традиционным способом может понадобиться сумма в миллионы рублей. Использование технологии PolyWax помогает сэкономить от 2 до 5 % по ценам серийного производства.



Леонид Павлов, проект 3D Printed Molds.

Для производства небольших партий перспективно выглядит разработка 3D Printed Molds. Создание песчано-полимерных литейных образцов по данной методике также позволяет экономить не только средства, но и время. Если традиционно процесс занимает 2-3 месяца, то, используя 3D Printed Molds, понадобится всего 10 дней. Для создания готового изделия необходимо изготовление 3D-модели детали и самой литейной формы, которые будут отпечатаны и послужат основой для литья.

Есть технология, позволяющая изготовить детали еще быстрее, – с использованием металлических 3D-принтеров. Но она значительно дороже, а прочность изделий – ниже.

Методика, предложенная 3D Printed Molds, подходит, когда готовое изделие необходимо получить в максимально быстрый срок, для создания уникальных экземпляров или мелкосерийного производства из алюминия, магния, стали и чугуна.

Авторы 3D Printed Molds собираются развивать свои наработки, внедрять передовые возможности прямого изготовления из металла, чтобы заменить литейное производство.

Сложности передовых печатных технологий

Первый двигатель, который был целиком изготовлен из созданных при помощи 3D-принтера деталей, тестировала компания General Electric. Испытания стартовали в мае этого года, и на данный момент авторы проекта с уверенностью заявляют, что двигатель и его детали пригодны для использования в авиационной отрасли.

Как скоро его можно будет применить, еще неизвестно.

Дмитрий Карелин из НПО «Сатурн» считает, что неразвитая нормативная база и отсутствие стандартов сильно тормозят внедрение инновационных разработок, полученных при помощи аддитивных технологий.

Анна Князева также называет и другую проблему: отсутствие сырья. Получение готового продукта с требуемыми физико-химическими характеристиками и соответствующего качества – серьезная трудность. На данном этапе выбор материала в большей степени представляет собой метод проб и ошибок, в котором модель после изготовления обязательно проходит испытания. Программы, которые позволяют просчитать нюансы и предсказать результат заранее, также пытаются создать специалисты.

И третья сложность: отсутствие опытных специалистов, которые умеют создавать правильные подсчеты для 3D-печатных моделей. В этом есть преимущество у стартап-проектов. В России отсутствует подготовка кадров: даже если в университете имеется 3D-принтер, пользоваться им студентам нельзя.

Перспективы развития передовой печати в промышленности.



Евгений Кузнецов, заместитель генерального директора, член правления РВК.

3D-технологии способны повлиять на разнообразные отрасли деятельности. Если это ремонт автомобилей, то сервис может самостоятельно изготовить деталь. Имея нерабочий образец, любая мастерская способна изготовить новый экземпляр. Подобная система может стать эффективной инфраструктурой.

В будущем производство должно стать более гибким и компактным. Массовый выпуск заменится на индивидуальный. При этом продукция, выпускаемая на принтере, станет дешевле. Распространены будут мастерские, которые находятся в пешей доступности, а фактор расположения производителя станет одним из самых ценных. Широкий ассортимент также будет играть важную роль.

Сегодня набирают популярность мини-мейкеры, или производство на компактном

оборудовании. Тенденция перехода от крупных заводов к небольшому производству зарождается уже сейчас.

Дмитрий Карелин, заместитель генерального конструктора НПО «Сатурн».

Выполнение индивидуальных заказов с высокой скоростью, снижение стоимости материалов в виде металла или порошка и возрастание скорости получения готовых изделий при помощи послойного лазерного синтеза будут активно вытеснять традиционные методики производства.

Это возможно благодаря постоянному развитию технологий. Композитные материалы, в которые можно встраивать датчики, начинают появляться уже сегодня.

Сокращение логистических затрат, максимальная близость производства к заказчику, объединение процесса в цельную цепь и развитие виртуализации – также одни из основных характеристик будущих технологий производства.

Еще один плюс в том, что аддитивные технологии отражают сущность самовосстанавливающихся систем: если роботизированный помощник обнаруживает поломку, то 3D-технологии позволяют заменить вышедшую из строя деталь.

Владимир Кузнецов, руководитель лаборатории цифрового производства FabLab.

Технологии делают процесс производства более демократизированным. Это зависит от 3D-печати, от применения цифровых технологий. Значительное влияние оказывает распространение информации, начиная с ее получения и заканчивая обработкой и ее распространением. Переход к распределенным системам сейчас можно наблюдать на сервисах Airbnb или Uber, но в будущем это ожидает сферу производства материальных объектов.

Но все же дело не только в том, как будут развиваться 3D-принтинговые технологии, но и в самих производственных системах, которые также переходят на новый уровень в системе своего развития. Вопрос состоит в том, как скоро это произойдет, увидит ли это будущее следующее поколение или же нам придется подождать 10–20 лет.

Анна Князева, Томский политехнический университет, проект «Моделирование синтеза новых материалов в SLM- и EBM-технологиях».

Можно сказать, что сейчас нас окружает море информации касательно аддитивных технологий. Но эту сферу ожидает бум, каких в науке было уже немало. В наиболее оптимистической перспективе снизится техногенная нагрузка на природные ресурсы за счет применения 3D-принтинга, кроме того, его использование позволит экономить природные материалы на 90%. Автоматизация и массовое производство – неотъемлемые характеристики будущего.

Леонид Павлов, проект 3D Printed Molds.

Наибольшие перспективы ожидают те отрасли, где цена деталей высока: медицина, космическая и авиационная сферы, военный сектор.

Однако 3D-принтинговая индустрия будет дешеветь: технология постоянно расширяется, и объемы производства растут. Форма изделий, их конструкция станут усложняться. Традиционное производство будет все менее популярным. Изготовить на принтере в перспективе можно все – от продуктов питания и до компьютера.

Будет осуществляться печать органическим материалом в медицине. Также следствием автоматизации станет доступность производства в том месте, где оно больше всего требуется.

Наиль Якупов, проект PolyWax.

Нас ждет будущее, в котором будут совмещаться как привычные способы производства, так и создание трехмерных объектов. Но полной замены производства на 3D-печать не произойдет, изменятся лишь несколько этапов.

Однако прорыв возможен при определенных условиях – это возможность создавать объекты на молекулярном уровне. При этом стоимость их не должна быть слишком высокой, а скорость производства, наоборот, следует максимально увеличить.

Такое сочетание позволит воплотиться всем футуристическим прогнозам, в которых каждый имеет домашний 3D-принтер для печати любых объектов.

Сергей Богданов, исполнительный директор Регионального центра инноваций (StartupSamara)

Универсальное производство всех видов деталей на одном заводе принесет внедрение технологий печати трёхмерных объектов. Сегодня каждый завод специализируется на чем-то конкретном, но через несколько лет станет работать другая схема. Заказчик сможет обратиться в конструкторское бюро, которое займется прорисовкой модели, подбором ее характеристик и отправлением на производство.

Промышленная отрасль станет кастомизированной. Обращаясь в сервис, не нужно будет дожидаться, пока деталь доставят, – ее можно будет просто напечатать.

Заводы станут выпускать изделия каких угодно размеров и форм, независимо от сложности, но принтеры для домашнего пользования будут также распространены.

Утро обычного человека сможет выглядеть следующим образом: проснулся, поставил на печать еду и обувь, собрался и отправился на работу. Все эти вещи будут повседневными.

3D-принтеры станут более компактными и универсальными. Используя одно устройство, можно будет распечатать и еду, и телефон!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологии и материалы 3D-печати [Электронный ресурс]: учеб, пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногой. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). ISBN 978-5-94984-616-2.
2. Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения: учеб. пособие / В.И. Гужов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – 82 с.
3. Амперка : Топ-5 ресурсов с бесплатными 3D-моделями : [сайт]. – Москва 2010-2023. – URL: <https://amperka.ru/page/where-to-find-3d-models> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
4. Геоскан : Фотограмметрия, как наука : [сайт]. Geoscan LTD 2022. – URL: <https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/complex-module/fotogrammetry/fotogrammetry.html> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
5. LIDER-3D : Как 3D технологии используются в разных отраслях : [сайт]. – Москва - 2023. – URL: <https://lider-3d.ru/wiki/nachinayushchim-v-3d-pechati/kak-3d-tekhnologii-ispolzuyutsya-v-raznykh-otraslyakh/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
6. 3DRADAR.RU : Технологии 3d сканирования: фотограмметрия, триангуляция, структурированный свет : [сайт]. 3DRadar.ru 2022. – URL: <https://3dradar.ru/post/47801/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
7. SHINING3D : 3D-сканеры: методы и технологии 3D-сканирования : [сайт]. Shining3D 2019. – URL: <https://www.shining3d.ru/blog/3d-skanery-metody-i-tehnologii/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
8. i3D Интегратор : Что такое 3D-сканирование? : [сайт]. i3D 2020. – URL: https://i3d.ru/blog/dlya_mozayki/что-такое-3d-skanirovanie/ (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
9. Цветной Мир : Принципы работы 3D-сканера. Виды сканеров, технологии и методы сканирования : [сайт]. Цветной Мир 2021. – URL: <https://cvetmir3d.ru/blog/poleznoe/printsipy-raboty-3d-skanera-vidy-skanerov-tekhnologii-i-metody-skanirovaniya/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
10. Top 3D Shop : Оптические 3D-сканеры: технологии, виды, модели : [сайт]. – Санкт-Петербург, ИП Баусов Д.В., 2013-2023. – URL: <https://top3dshop.ru/blog/optical-scanners-review.html> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
11. Industru3D : Технологии сканирования : [сайт]. industry3d 2021. – URL: <https://industry3d.ru/handbook/3d-scanning-technologies/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
12. АБС Авто : Как превратить фотоаппарат или смартфон в 3D-сканер : [сайт]. АБС Авто 2017. – URL: <https://abs-magazine.ru/article/kak-prevratit-fotoapparat-ili-smartfon-v-3d-skaner> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
13. 3D Today : 3D сканирование и фотограмметрия: плюсы и минусы : [сайт]. 3D Today 2021. – URL: <https://3dtoday.ru/blogs/bss0413/3d-skanirovanie-i-fotogrammetriya-plyusy-i-minusy> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
14. Canon Russia : 3D-фотограмметрия: превращая фотографии в 3D-модели : [сайт]. Canon Russia 2023. – URL: <https://div.ru.mycanon.net/pro/stories/3d-photogrammetry> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
15. KOLORO : Виды 3d моделирования: полигональное, сплайновое и nurbs моделирование : [сайт]. KOLORO 2023. – URL: <https://koloro.ua/blog/3d-tekhnologii-vidy-3d-modelirovaniya-poligonalnoe-splajnovoe-i-nurbs-modelirovanie.html> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.

16. KOLORO : Система автоматизированного проектирования. Параметрическое, поверхностное и твердотельное моделирование : [сайт]. KOLORO 2023. – URL: <https://koloro.ua/blog/3d-tekhnologii/sistema-avtomatizirovannogo-proektirovaniya.-parametricheskoe-poverhnostnoe-i-tverdotelnoe-modelirovanie.html> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
17. RangeVision : Преимущества NURBS при реверс инжиниринге : [сайт]. RangeVision 2021. – URL: <https://rangevision.com/application/examples/revers-inzhiniring-i-kontrol-geometrii/advantages-of-using-nurbs-in-organic-modeling-and-reverse-engineering/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
18. ГикБрейнс : 3D-моделирование: виды, принципы, инструменты : [сайт]. GeekBrains 2023. – URL: <https://gb.ru/blog/3d-modelirovanie/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
19. Хабр : Виды моделирования. Основы скульптинга, ретопологии и развертки : [сайт]. Habr 2006-2023. – URL: <https://habr.com/ru/post/448228/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
20. Школа "Art and Shock" : Виды 3D-моделирования : [сайт]. Art and Shock 2023. – URL: <https://artandshock-school.com/3dblog/vidy-3d-modelirovaniya/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
21. 3D-MODEL.NET : Виды 3d моделирования : [сайт]. 3D-MODEL.NET 2015-2022. – URL: <https://3d-model.net/uroki-videokursi/3d-grafika/6175-vidy-3d-modelirovaniya.html> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
22. iQB Technologies : От воска до металла: обзор основных материалов для 3D-печати : [сайт]. iQB Technologies 2023. – URL: <https://blog.iqb.ru/3d-printing-materials/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
23. Globatek 3D : Материалы для 3D-печати : [сайт]. Globatek 3D 2010-2022. – URL: <https://globatek.ru/3d-wiki/3d-print-materials> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
24. 3D Service : Сравнение технологий 3D-печати: FDM, SLA, SLS : [сайт]. ТОВ "3Д Сервис" 2017-2022. – URL: <https://www.3ds.com.ua/post/%D1%81%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%B9-3d-%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%B0%D1%82%D0%B8-fdm-sla-sls> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
25. 3DDevice : Как выбрать технологию для настольной 3d-печати: fdm, sla и sls. Функциональные и визуальные характеристики : [сайт]. 3DDevice 2021. – URL: <https://3ddevice.com.ua/blog/tekhnologii-pechati-3d-printerov/%D0%B2%D1%8B%D0%B1%D0%BE%D1%80-%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%B8-3d-%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%B0%D1%82%D0%B8-%D1%81%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D0%BC-2/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
26. i3D Интегратор : Как выбрать 3D принтер : [сайт]. i3D 2020. – URL: https://i3d.ru/blog/dlya_mozayki/kak-vybrat-3d-printer/ (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
27. 3Dtool : Как выбрать 3D принтер: 8 нюансов на которые стоит обратить внимание : [сайт]. 3Dtool 2013-2023. – URL: <https://3dtool.ru/stati/vybor-3d-printera-8-nyuansov-na-kotorye-stoit-obratit-vnimanie/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
28. Top 3D Shop : Как выбрать 3D-принтер по характеристикам : [сайт]. – Санкт-Петербург, ИП Баусов Д.В., 2013-2023. – URL: <https://top3dshop.ru/blog/kak-vybrat-3d-printer-po-harakteristikam.html> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.

29. Фолипласт : Фотополимерный 3D-принтер: какой выбрать : [сайт]. "ТПК"Фолипласт" 2023. – URL: <https://www.foliplast.ru/info/articles/oborudovanie/fotopolimernyy-3d-printer-kakoy-vybrat/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
30. i3D Интегратор : Как выбрать 3D-сканер : [сайт]. i3D 2020. – URL: <https://i3d.ru/blog/brend-3d-printery-materialy/scantech/kak-pravilno-vybrat-3d-skaner/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
31. Cybercom : Как выбрать 3D сканер : [сайт]. Cybercom Ltd. 2005-2022. – URL: https://cybercom.ru/info/articles/2017/kak_vybrat_3d_skaner/ (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
32. Globatek 3D : Как выбрать профессиональный 3D-сканер : [сайт]. Globatek 3D 2010-2022. – URL: <https://globatek.ru/3d-wiki/kak-vybrat-3d-skaner> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
33. Меженин А.В. Технологии разработки 3D-моделей. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 100 с.
34. STANKIEXPERT : Программы, технологии и процесс 3D-моделирования : [сайт]. STANKIEXPERT.RU 2015-2023. – URL: <https://sterbrust.tech/tehnologii/3d-modelirovanie.html> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
35. Чем открыть : MeshLab : [сайт]. Чем открыть 2011-2020. – URL: <http://pervoiskatel.ru/soft/MeshLab> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
36. Junior : Подробный обзор программы Autodesk MeshMixer : [сайт]. Junior 2012-2023. – URL: <https://junior3d.ru/article/meshmixer.html> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
37. Vektorus : 20 самых-самых: слайсеры для 3D-принтеров, особенности ПО, его плюсы и минусы : [сайт]. Vektorus 2023. – URL: <https://vektorus.ru/blog/slajser-dlya-3d-printera.html> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
38. iQB Technologies : 17 передовых программ для обработки данных 3D-сканирования: [сайт]. iQB Technologies 2023. – URL: <https://blog.iqb.ru/3d-software/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
39. 3DRADAR.RU : Программы для 3d сканирования : [сайт]. 3DRadar.ru 2022. – URL: <https://3dradar.ru/post/47939/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
40. 3DRADAR.RU : Лучшие приложения 3D сканеры для смартфонов Android и iPhone : [сайт]. 3DRadar.ru 2022. – URL: <https://3dradar.ru/post/47780/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
41. : Digital Academy : Подборка лучших программ для 3D-моделирования для начинающих и профи [сайт]. Digital Academy 2022. – URL: <https://digital-academy.ru/blog/programmy-dlya-3d> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
42. GeekBrains : 10 популярных программ для 3D-моделирования : [сайт]. GeekBrains 2023. – URL: <https://gb.ru/posts/10-populyarnyh-programm-dlya-3d-modelirovaniya> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
43. 3D технологии для дома и бизнеса : Обзор основных программ для 3d-моделирования : [сайт]. Losprinter 2018. – URL: <https://losprinters.ru/articles/obzor-osnovnyh-programm-dlya-3d-modelirovaniya/> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.
44. Основы 3D моделирования и создания 3D моделей [Электронный ресурс]: учеб, пособие – Воронеж: Центр технологических компетенций аддитивных технологий (ЦТКАТ), 2019 – 13 с.
45. 3D Print Expo : Эксперты — о перспективах 3D-технологий в промышленности : [сайт]. 3D Print Expo 2023. – URL: <https://3d-expo.ru/article/eksperti-o-perspektivah-3d-tehnologiy-v-promishlennosti> (дата обращения 1.02.2023) . – Текст : электронный.