

**В.А. Валетов**

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
(СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ)**



**Санкт-Петербург**

**2015**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**В. А. Валетов**

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
(СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ)**

**Учебное пособие**



**Санкт-Петербург  
2015**

**Валетов В. А.** Аддитивные технологии (состояние и перспективы). Учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2015, – 63с.

Учебное пособие разработано в соответствии с государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования и предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 12.04.01. – Приборостроение.

В пособии рассматриваются устройство и принципы действия основных серийных аддитивных установок, области их использования и современные возможности. Даны рекомендации использования аддитивных технологий на всех этапах жизненного цикла изделий приборостроения и рассмотрены реальные перспективы развития и применения их в различных отраслях техники и технологии.

Все вышесказанное в полной мере относится и к области машиностроения. Таким образом, данное пособие будет полезным для студентов и преподавателей большинства технических специальностей.

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета Компьютерных технологий и управления, протокол №10 от 08.12.2015г.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
(СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ)**

## Оглавление

Сокращения, принятые в пособии .....	5
Введение .....	6
1. Устройство и принцип действия типовых аддитивных установок .....	8
1.1 Предисловие .....	8
1.1.1 Размер изготавливаемого изделия .....	10
1.1.2 Производительность .....	10
1.1.3 Материалы .....	10
1.1.4 Точность .....	10
1.1.5 Стоимость установок .....	10
1.2 Стереолитография .....	11
1.2.1 Стереолитографические аппараты .....	15
1.2.2 Высокая точность и надежность .....	15
1.3 Аддитивные технологии с использованием тепловых процессов .....	19
1.3.1 Технология SLS .....	19
1.3.2 LOM-технология .....	22
1.3.3 FDM-технология .....	25
1.3.4 Трехмерная печать (3D Printers) .....	28
1.3.4.1 Принтеры Genisys .....	30
1.3.4.2 Принтеры Z Corporation .....	32
1.3.4.3 Принтер Z 402 (ZCorporation) .....	34
1.3.4.4 ZPrinter 310 Plus .....	35
1.3.4.5 Принтер ZPrinter 510 System .....	35
1.3.4.6 Принтер ZPrinter 810 System .....	36
1.3.4.7 Принтер Objet Geometries Ltd (Израиль) .....	37
1.3.4.8 Принтер Eden250™ .....	38
1.3.4.9 Принтер Eden330™ .....	38
1.3.4.10 Принтер InVision™ HR .....	39
1.3.4.11 Принтеры фирмы Contex .....	40
1.3.5 Обычное практическое применение аддитивных технологий .....	41
1.3.5.1 QuickCast. Литье по выжигаемым стереолитографическим моделям .....	41
1.3.5.2 Литье в эластичные силиконовые формы в вакууме .....	43
1.3.5.3 Промежуточная оснастка .....	44
1.3.5.4 АТ с использованием листовых материалов .....	47
2. Перспективы развития аддитивных технологий .....	50
2.1 Усовершенствование освоенных АТ .....	50
2.2 Перспективы АТ .....	50
Литература .....	55

## **Сокращения, принятые в пособии**

АТ – аддитивные технологии;

CAD-системы – современные системы компьютерного проектирования;

RP – Rapid Prototyping – технологии быстрого прототипирования;

SLS – Selective Laser Sintering – лазерное спекание порошковых материалов;

LOM – Laminated Object Manufacturing – изготовление объектов с использованием ламинирования;

SL – Stereolithography – стереолитография;

FDM – Fused Deposition Modeling – нанесение термопластов;

ABS-пластик – термопластическая ударопрочная техническая смола, сополимер акрилонитрил-бутадиен-стирол.

## Введение

Аддитивные технологии (АТ) [1,2] начали интенсивно развиваться со времени получения первых трехмерных изображений изделий на дисплеях компьютеров. Начало положила стереолитография, затем довольно многочисленные новые принципы стали называть технологиями быстрого прототипирования (Rapid Prototyping) и, наконец, укоренилось название «Аддитивные технологии».

Интенсивность их развития не имеет аналогов. Эти технологии принципиально изменили процессы проектирования и конструирования изделий, превратив их в процессы непрерывного создания изделий. Конечно, еще много не решенных задач в области производительности аддитивных процессов, в области точности производимых изделий, в области материалов, используемых для изготовления изделий, но все эти проблемы решаемые. А главное в том, что уже современные проектирование и производство изделий немислимо без аддитивных технологий и на Западе, например, 3D-принтеры стали такими же привычными и распространенными, как персональные компьютеры.

Уже сейчас с помощью стандартных 3D-принтеров получают ткани, обувь, продукты питания и даже выращивают живые человеческие органы.

Во многих отраслях, например, в космической отрасли, альтернативы аддитивным технологиям не видно уже сегодня.

Подготовка специалистов по АТ в отдельных предприятиях востребована уже сейчас, а в ближайшее время такие специалисты станут необходимыми во всех отраслях народного хозяйства и, прежде всего, в отраслях приборостроения и машиностроения. Еще с конца прошлого столетия на кафедре ТПС читается курс «Новые технологии в приборостроении», в котором основное внимание уделяется аддитивным технологиям. Этот курс постоянно совершенствовался и в 2004 УМК по этому курсу содержал уже все необходимые компоненты, а аспирантка Бобцова С.А. в 2005 году защитила кандидатскую диссертацию по технологиям быстрого прототипирования. Начиная с 2007 года кафедра постоянно пополняет новейшим оборудованием все свои лаборатории, что позволяет использовать его как в учебных, так и в научных целях. При этом, аддитивные установки (их на кафедре уже 2) широко используют аспиранты в своих исследованиях и выполняются различные заказы промышленных и проектных предприятий. Кафедра ТПС поддерживает устойчивые связи не только с предприятиями России, но и с некоторыми вузами стран СНГ и западноевропейских стран.

Наличие постоянных контактов с некоторыми западноевропейскими вузами и систематические стажировки в них студентов кафедры и отдельных сотрудников создают уверенность в налаживании деловых контактов и в области аддитивных технологий. Судя по последним публикациям, альтернативы аддитивным технологиям не видно и вряд ли они когда-нибудь возникнут, поэтому нам уже нужны специалисты по эксплуатации аддитивных установок, но еще больше нужны специалисты по совершенствованию и

дальнейшему развитию таких технологий. Случай позволил одним из первых в России ознакомиться, а затем и освоить аддитивные технологии, а теперь у нас появилась реальная возможность одним из первых в стране приступить к подготовке дипломированных специалистов по этой уникальной профессии.



# **1. Устройство и принцип действия типовых аддитивных установок**

В данном разделе рассмотрены только аддитивные технологии, получившие в настоящее время наиболее широкое применение.

## **1.1 Предисловие**

Разработка нового вида изделия – длительный и трудоемкий процесс, требующий нескольких этапов проектирования и оценки до того момента, как начнется массовый выпуск. Резко ускорить прохождение этих этапов помогают внедряющиеся во всем мире методы 3-х мерного компьютерного моделирования. Также современные системы компьютерного проектирования (CAD) позволяют значительно сократить затраты времени и средств на разработку и конструирование новых изделий. Однако проблема изготовления первого физического образа и даже отдельной детали для изделия сколь угодно сложной формы остается наиболее узким местом, поскольку разработка технологии изготовления детали и соответствующей оснастки зачастую требуют затрат, сопоставимых со стоимостью разработки самого изделия.

В процессе работы над новым проектом, особенно на стадии комплексного проектирования, трудно выявить различные ошибки и недостатки, используя только экран дисплея. Имея реальную физическую модель будущего изделия можно выявить и устранить различные ошибки, скорректировать пути продолжения процесса проектирования. Прототип изделия можно использовать в качестве концептуальной модели для визуализации и анализа конструкции. Он позволяет конструкторам выполнить доработку и провести некоторые функциональные тесты, а также может служить мастер-моделью для изготовления инструментальной оснастки. Кроме того, прототип может использоваться в маркетинговых целях или при определении стоимости изготовления.

Контрольные модели уменьшают затраты на проектирование и подготовку производства за счёт выявления возможных ошибок на ранних стадиях, и усиливают связь и взаимопонимание между проектировщиками и заказчиками, сокращая время выхода продукта на рынок.

Именно поэтому, в конце 80-х начали интенсивно развиваться технологии формирования трехмерных объектов не путем удаления материала (точение, фрезерование, электроэрозионная обработка) или изменения формы заготовки (ковка, штамповка, прессовка), а путем постепенного наращивания (добавления) материала или изменения фазового состояния вещества в заданной области пространства. На данный момент значительного прогресса достигли технологии послойного формирования трехмерных объектов по их компьютерным образам. Эти технологии наиболее известны как технологии быстрого прототипирования (RP – Rapid Prototyping), а теперь их стали называть аддитивными технологиями. При традиционном способе получения физических моделей будущих изделий или опытных образцов затрачивается от нескольких недель до нескольких месяцев, что приводит к повышению затрат

на разработку нового изделия и задержке сроков выпуска новой продукции. Термин "аддитивные технологии" означает класс процессов, которые автоматически создают сложные трехмерные физические объекты без инструментального их изготовления, путем преобразования данных, поступающих из CAD-системы. Появление систем быстрого изготовления прототипов было переворотом в технологии. Вместо того чтобы ждать физические модели на протяжении нескольких недель, конструкторы могут получать их уже через несколько дней или часов.

Аддитивные технологии нашли широкое применения в таких отраслях промышленности, как автомобиле- и самолетостроении, электронике, медицине, где создаются сложные машины и оборудование, изготавливается множество экспериментальных моделей и макетов деталей, требующих много времени для конструирования и изготовления.

В настоящее время на рынке существуют различные аддитивные системы, производящие модели по различным технологиям и из различных материалов. Однако, все они работают по схожему, послойному принципу построения физической модели, который заключается в следующем:

- считывание трёхмерной геометрии из 3D CAD-систем (рисунок 1.1а);
- разбиение трёхмерной модели на горизонтальные сечения (слои) с помощью специальной программы, поставляемой с оборудованием или используемой как приложение (рисунок 1.1б);
- построение сечений детали слой за слоем снизу-вверх, до тех пор, пока не будет получен физический прототип модели. Слои располагаются снизу-вверх, один над другим, физически связываются между собой. Построение прототипа продолжается до тех пор, пока поступают данные о сечениях CAD-модели (рисунок 1.1в).

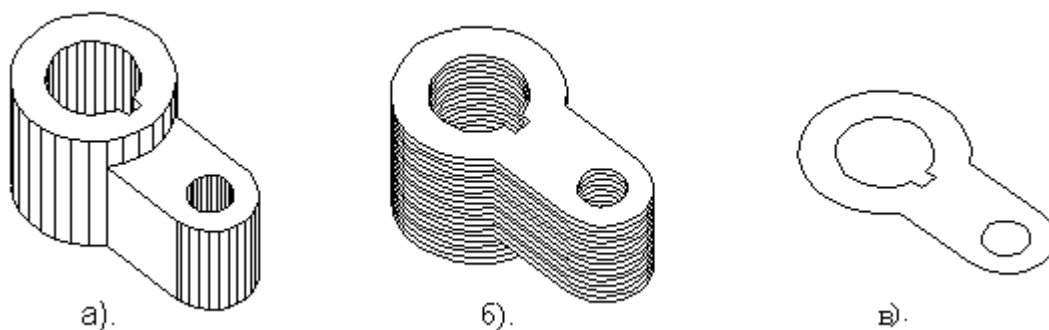


Рисунок 1.1 – Принцип построения физической модели

Первая аддитивная система появилась на рынке в 1987 году. Начало всему положила компания 3DSystems, которая выпустила свои стереолитографические машины. В настоящее время большое число фирм представляют на рынке свою продукцию. Наибольшее распространение получили ниже перечисленные аддитивные технологии:

- стереолитография (SL – Stereolithography);

- нанесение термопластов (FDM – Fused Deposition Modeling);
- лазерное спекание порошковых материалов (SLS – Selective Laser Sintering);
- изготовление объектов с использованием ламинирования (LOM – Laminated Object Manufacturing);
- 3D-принтеры.

Наиболее важными характеристиками аддитивных установок являются следующие.

### **1.1.1 Размер изготавливаемого изделия**

Габариты создаваемого изделия ограничены размерами "строительной камеры". В зависимости от машины, размеры его колеблются от 20x20x20 мм до 600x500x600 мм. Однако, большие изделия могут быть изготовлены по частям и затем собраны в одно изделие.

### **1.1.2 Производительность**

Скорость построения изделия зависит от таких факторов, как: его размер; используемые материалы; программное обеспечение и др.

### **1.1.3 Материалы**

На рынке предлагается целый спектр материалов, различающихся по степени прочности и качеству образуемой структуры. В зависимости от процесса, в АТ используются следующие основные материалы: полистирол, термопластик, бумага, акрил, поликарбонат, нейлон, ABS, синтетические смолы и др.

### **1.1.4 Точность**

Точность изделия (степень соответствия САD-модели) определяется факторами:

- правильность САD-файлов;
- разрешение (толщина слоёв);
- свойства используемого материала.

### **1.1.5 Стоимость установок**

Разработчики АТ в последнее время ориентируются на выпуск недорогих и быстродействующих машин, снижая стоимость и увеличивая объём рабочей камеры.

Таким образом, АТ позволяют значительно сократить сроки изготовления изделий для визуализации, подгонки, изготовления оснастки и других применений, а часто и готовых изделий, что обеспечивает:

- сокращение цикла разработки;
- улучшение дизайна;
- повышение качества;
- уменьшение цены продукта и производства;

– ускорение внесения изменений в конструкцию.

АТ стали важнейшей частью CAD/CAM-процесса. Они позволяют пользователям за короткое время проверить данные CAD-систем. Увеличивающееся использование твёрдотельного моделирования обеспечивает распространение АТ. Повышается качество материалов и точность изделий. Всё это говорит о том, что АТ будут занимать всё большее место в создании изделий. В недалеком будущем они будут доступны любому пользователю и станут привычным инструментом человека, повышая качество проектирования и сокращая время выпуска новой продукции.

## 1.2 Стереолитография

Начало всем АТ положила стереолитография. Стереолитография (SL) была представлена компанией 3D Systems в 1987 году, и в настоящее время многие из этих стереолитографических систем (Stereo Lithography Apparatus – SLA) установлены и используются компаниями во всем мире. И с каждым днем число этих систем растет. Стереолитографические системы производят точные фотополимерные твердотельные объекты из трехмерных CAD данных.

Основой стереолитографии является локальное изменение фазового состояния однородной среды (переход "жидкость – твердое тело") в результате фотоинициированной в заданном объеме полимеризации. Суть фотополимеризации состоит в создании с помощью иницирующего (в данном случае лазерного) излучения в жидкой реакционноспособной среде активных центров (радикалов, ионов, активированных комплексов), которые, взаимодействуя с молекулами мономера, инициируют рост полимерных цепей. Следствием этого является изменение фазового состояния среды, то есть в облученной области образуется твердый полимер. Схема стереолитографической установки изображена на рисунке 1.2.

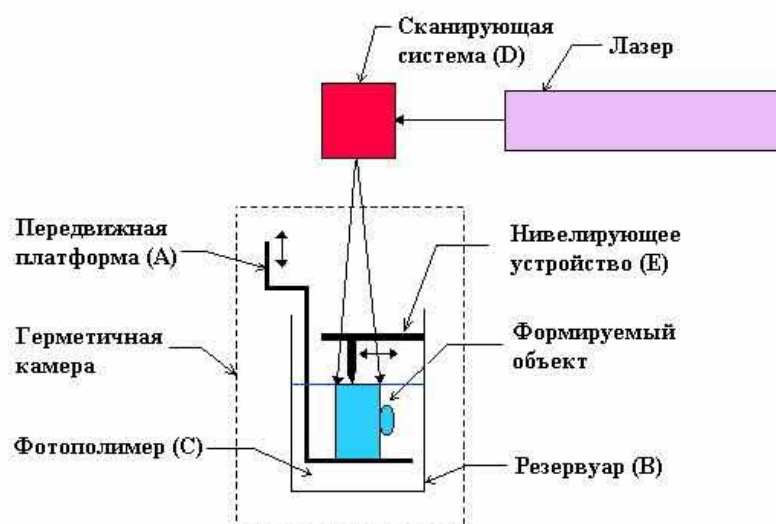


Рисунок 1.2 – Схема стереолитографической установки

Впервые данная технология предложена Чарлзом Хеллом (Charles Hall) в 1984 г. В настоящее время установки по стереолитографии производятся

компанией 3D systems Inc, USA (90% всего рынка), а производить эти технологические установки стали с 1988 г.

Структурная схема работы технологии показана на рисунке 1.2.

Передвижная платформа или подъемник (А), первоначально помещены на низ поверхности резервуара (В), который заполняется жидкой полимерной смолой (С). Ванна с полимером обычно вмещает 20-200 литров. Этот материал имеет особенность – отверждаться под действием ультрафиолетового излучения. В основном используются He-Cd или Ar-ионный лазеры, работающие в области УФ излучения (длина волны 320-370 нм). Физика процесса основана на поглощении фоточувствительным полимером лазерного излучения конкретной длины волны, в результате чего в месте поглощения наблюдается процесс радикальной полимеризации (т.е. отверждения) полимера.

Обычно используются материалы, которые отвердевают при использовании ультрафиолетового излучения, но бывают смолы, которые отвердевают под воздействием видимого излучения. Фотополимер очень светочувствителен и токсичен, поэтому ванна должна быть защищена от света и иметь проточную вентиляцию.

Лазерный луч перемещается по поверхности жидкого фотополимера, чтобы "очертить" геометрию сечения объекта. Смола застывает только там, где ее касался лазерный луч, который перемещается в плоскости X-Y под управлением сканирующей системы (D). Сканирующая система включает в себя дефлекторы, которые управляют зеркалами, причем информация о перемещениях поступает из САД данных. Таким образом, лазерный луч перемещается очень быстро и по заданному контуру.

Изделие опускается вниз (прибл. на 0,5-1,3 мм) на некоторое время, в течении которого ее поверхность заполняется неполимеризованной жидкостью, далее нивелирующее устройство (Е) удаляет излишки жидкого полимера с поверхности. (Заметим, что амплитуда колебаний жидкости должна быть заранее выверена). Изделие опускается вниз, в то время как сфокусированный лазерный луч остается на поверхности полимера. При отверждении происходит усадка полимера. Эта усадка может привести к изменению объема жидкости в ванне и должна все время проверяться. В случае отклонения уровень восстанавливается. Толщины слоев составляют от 50 до 500 мкм. Это контролируется для определения, на какую величину опускать платформу. Чем тоньше отвержденные слои, тем точнее, "глаже" поверхность изделия, но с другой стороны процесс идет дольше. Параметры лазерного излучения стабилизированы, но дефлектора позволяют управлять движением луча по X-Y поверхности жидкости.

Рассмотренные шаги повторяются, пока объект полностью не изготовлен. Некоторые конфигурации объектов могут иметь нависающие конструкции, которые должны быть поддержаны в течение процесса изготовления. Поддержки (т.е. внутренние или внешние "переборки") создаются на стадии компьютерной обработки 3-х мерного вида изделия при помощи различных программ (напр. Solid Concepts, Los Angeles, California).

Они позволяют:

- стабилизировать выступы, консоли на краях изделия;
- предотвратить расслаивание в сложных участках изделия;
- корректировать возможное искривление слоев на платформе;
- позволяет легко отделять синтезированное изделие от основания-платформы;
- облегчает синтез сложных моделей, создавая их из нескольких частей.

После того как процесс изготовления объекта закончен, готовое изделие поднимается над уровнем жидкости, и ее излишки стекают. После выемки изделия из ванны, оно помещается в печь для дополнительного отверждения полимера. Лазерная мощность составляет 10-200 мВ (чем она больше, тем быстрее идет процесс полимеризации).

Лазерная стереолитография позволяет получить очень сложные цельно выращенные изделия. Практически же ограничения по форме связаны только с невозможностью вырастить изделия с полностью изолированными внутренними полостями. Точнее, вырастить-то можно, но при этом в полости останется не удаленная жидкая смола, которая в дальнейшем полимеризуется.

Этот процесс на рисунке 1.3 представлен схематично в виде рисунков и кратких пояснений к ним.

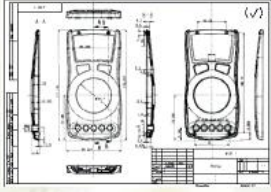
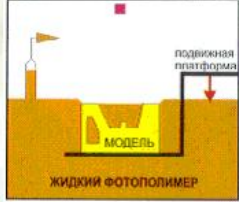
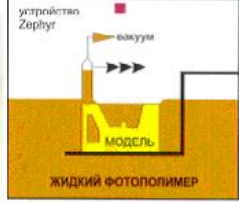
Изготовление стереолитографической модели	Принцип построения модели по технологии стереолитографии
 <p>1. Исходные данные представлены в виде чертежа</p>	 <p>4а. Построение детали лучом лазера на поверхности жидкого фотополимера</p>
 <p>2. Создать трехмерную математическую модель детали</p>	 <p>4б. Платформа с моделью погружается в полимер на толщину слоя</p>
 <p>3. Подготовить управляющую программу (ориентация модели, задание машинных параметров, автоматическое создание элементов поддержки и раслаивание)</p>	 <p>4с. Устройство Zephyr проходит над поверхностью модели и наносит слой жидкого фотополимера</p>
 <p>4. Изготовить модель детали на установке стереолитографии</p>	 <p>4д. Лазер формирует следующий слой модели</p>

Рисунок 1.3 – Схема технологического процесса "стереолитографии"

Преимущества:

- установка полностью автоматизирована и работает без вмешательства оператора;
- высокая точность воспроизведения изделия;
- острые края изделия заполняются полимером, что уменьшает склонность к расслоению;
- большая популярность этого процесса.

- Недостатки:
- длительное время на пост-обработку (16 и более часов);
- усадка полимера при отверждении приводит к деформациям формы поверхности, а, следовательно, уменьшает точность воспроизведения;
- химическая токсичность полимера и чистящих ванну средств;
- ограниченное количество возможных для использования типов полимеров (высокая цена \$100-200 за литр);
- необходима высокая техническая подготовка персонала и затраты на обслуживание оборудования;
- при синтезе необходимы "переборки";
- требуются работы по удалению этих переборок после синтеза.

### **1.2.1 Стереолитографические аппараты**

Основным провайдером технологии SLA и производителем оборудования является компания 3D Systems, основанная в 1986 году. В настоящее время компания является лидером по продажам и производству на рынке RP-систем – стереолитографов и 3D принтеров.

Первой стереолитографической системой, выпущенной на рынок в 1987 году фирмой 3D Systems, является SLA-250 (рисунок 1.4, б).

Стереолитографические установки серии SLA-250 позволяют изготавливать сложные концептуальные изделия, действующие образцы и мастер-модели для быстрого изготовления оснастки. Благодаря высокой точности и скорости построения изделий, их отличному качеству, установки SLA-250 с успехом применяются при разработке новых изделий на сотнях предприятий автомобильной и аэрокосмической промышленности, на предприятиях, изготавливающих компьютеры, потребительские товары и медицинскую технику.

Использование SLA-250 позволяет выявить ошибки на ранних стадиях проектирования, повысить качество изделия, быстро изготовить оснастку и сократить сроки и затраты на подготовку серийного производства. Применение установок серии SLA-250 позволяет создавать конкурентоспособные изделия.

### **1.2.2 Высокая точность и надежность**

Установка SLA-250 обеспечивает построение сложных изделий, отличающихся исключительно высокой точностью и качеством поверхности. Размеры камеры установки SLA-250 (250x250x250 мм) позволяют изготавливать изделия практически любых габаритов, т.к. они могут состоять из нескольких склеенных частей. Такие высоконадежные узлы, как He-Cd лазер, имеющий гарантию на 2000 часов и система выравнивания, обеспечивают возможность непрерывной работы установки SLA-250 в автоматическом режиме, что повышает производительность системы. Конструкция установки SLA-250 обеспечивает простоту инсталляции при весьма умеренных требованиях к вентиляции и возможности использования



стандартной электросети. Расширение возможностей установки SLA-250 может происходить за счет модернизации.

Новое поколение оборудования стереолитографии (SL) представлено установкой SLA-3500. Эта установка позволяет изготавливать изделия средних размеров с высокой производительностью, благодаря применению сложных узлов, рассчитанных на надежную работу в течение многих лет. Производительность установки SLA-3500 на 53% выше, чем у SLA 250. Камера установки SLA-3500 имеет достаточное пространство для изготовления изделий средних размеров или нескольких изделий одновременно. SLA-3500 снабжена новым твердотельным лазером из Nd:YVO<sub>4</sub>, работающим с утроенной частотой, который обеспечивает мощность в рабочей камере не менее 160Вт в течение 5000 часов работы.

Следующая стереолитографическая установка, представленная американской компанией 3D Systems – SLA-5000 (рисунок 1.4, а). В ней использованы все новейшие достижения в области стереолитографии, значительно повышающие скорость построения изделия и обеспечивающие простоту эксплуатации. Скорость построения изделия на SLA-5000 на 35% выше, чем на SLA-500. Установка обеспечивает высокие темпы разработки новых изделий. Максимальные размеры построения изделия SLA-5000 составляют 508x508x584 мм, позволяя изготавливать крупногабаритные конструкции или одновременно несколько одинаковых (различных) изделий. Рабочая камера имеет две двери, что существенно облегчает операцию извлечения готовых изделий. SLA-5000 оснащена твердотельным ультрафиолетовым лазером повышенной мощности.

Одна из самых последних стереолитографических систем – SLA-7000 (рисунок 1.4, в).

Она, в среднем, на 400% быстрее, чем предыдущая система быстрого моделирования от 3D Systems. Кроме того, толщина слоя в 0,0254 мм создает гладкую поверхность, что сказывается на уменьшении времени последующей обработки. Высоконадежная конструкция пятого поколения, включающая оптическую систему с низкой вибрацией и революционную технологию лазера с двойным диаметром пятна, уменьшает простои и ошибки.

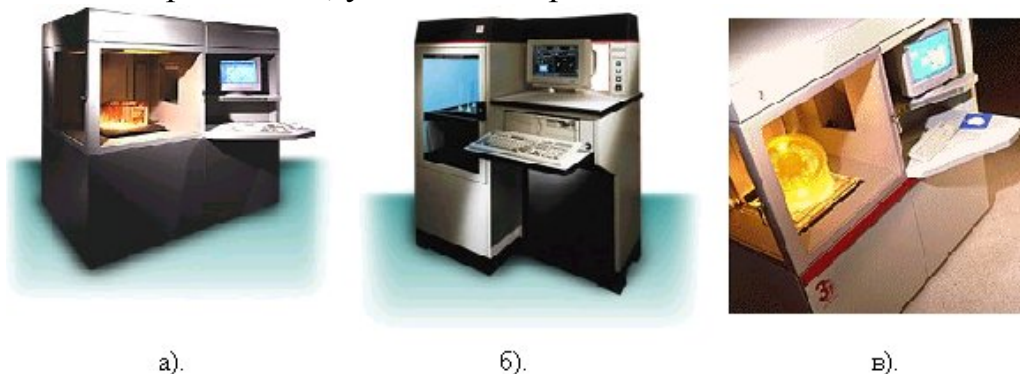


Рисунок 1.4 – Стереолитографы: а) SLA-5000, б) SLA-250, в) SLA-7000

Ниже представлена таблица 1.1 сравнения параметров различных стереолитографических установок.

Таблица 1.1 – Параметры различных SLA-установок

		SLA-250	SLA-3500	SLA-5000	SLA-7000
<b>Лазер</b>	<b>Тип</b>	Гелий-кадмиевый HeCd	Твердотельный Nd:YVO4	Твердотельный Nd:YVO4	Твердотельный Nd:YVO4
	<b>Длина волны</b>	325 нм	354,7 нм	354,7 нм	354,7 нм
	<b>Мощность</b>	25 мВт	160 мВт	216 мВт	800 мВт
<b>Система нанесения слоев</b>	<b>Способ</b>	Устройство Zephyr	Устройство Zephyr	Устройство Zephyr	Устройство Zephyr
	<b>Минимальная толщина слоя</b>	0,1 мм	0,05 мм	0,05 мм	0,025 мм
	<b>Диаметр луча</b>	0,20-0,29 мм	0,23-0,28 мм	0,23-0,28 мм	
	<b>Меньшее пятно</b>				0,23-0,28 мм
	<b>Большее пятно</b>				0,685-0,838 мм
	<b>Максимальная скорость построения</b>	792 мм/с	2,54 м/с	5,0 м/с	
	<b>Меньшее пятно</b>				2,54 м/с
<b>Большее пятно</b>				9,52 м/с	
<b>Подвижная платформа</b>	<b>Вертикальное разрешение</b>	0,0025 мм	0,0018 мм	0,00177 мм	0,00125 мм
	<b>Максимальный вес изделия</b>	9,1 кг	56,8 кг	68,4 кг	68,04 кг
<b>Ванна</b>	<b>Объем</b>	32,21 л	99,3 л	253,6 л	253,6 л
	<b>Максимальные размеры изделия</b>	250x250x250 мм	350x350x400 мм	508x508x600 мм	508x508x600 мм
	<b>Сменная ванна</b>	да	да	да	да

Точность при изготовлении изделий является одним из важнейших факторов. Анализ ранее выполненных исследований и экспериментов с участием автора позволил установить три важнейших фактора, влияющих на точность изготовления изделий:

- параметры установки;
- послойное построение изделия;
- материал изделия.

Приведенная ниже таблица (см. таблицу 1.2) показывает зависимость толщины слоя от материала при изготовлении изделий методом АТ-стереолитографии. Из таблицы следует, что наиболее точные изделия можно получить, используя материалы на основе эпоксидных композиций (например, SL7540 и другие). Это связано с тем, что эпоксидные полимеры имеют меньшую усадку, в отличие от акрилатных полимеров. Усадка для материалов на основе эпоксидных композиций составляет  $0,06 \pm 0,06\%$ , а на основе акрилатных –  $0,6 \pm 0,1\%$ . Кроме того, точность повышается при применении

современного оборудования. Из таблицы видно, что при применении стереолитографической установки SLA-7000 можно достичь точности 0,025 мм. В таблице 1.2 представлена зависимость толщины слоя от материала изделия.

Таблица 1.2 – Зависимость толщины слоя от материала при изготовлении изделий методом АТ-стереолитографии

Стереолитографические установки	SLA7000	SLA5000	SLA3500	SLA500	SLA250
<b>Материал</b>					
<b>SL7540</b>	0,025 мм	0,05 мм	0,05 мм		
<b>SL7520</b>	0,025 мм				
<b>SL7510</b>	0,025 мм	0,05 мм	0,05 мм		
<b>SL5530</b>	0,025 мм	0,05 мм	0,05 мм		
<b>SL5520</b>		0,1мм	0,1мм		
<b>SL5510</b>		0,05 мм			
<b>SL5440</b>				0,1мм	
<b>SL5430</b>				0,1мм	
<b>SL5410</b>				0,15 мм	
<b>SL5240</b>					0,1мм
Продолжение таблицы 1.2					
<b>SL5220</b>					0,1мм
<b>SL5210</b>					0,1мм
<b>SL5195</b>		0,05 мм			
<b>SL5190</b>			0,05 мм		
<b>SL5180</b>				0,1мм	
<b>SL5170</b>					0,1мм

В таблице 1.3 приведены значения толщины слоя и точность позиционирования платформы по осям для различных SLA-установок.

Таблица 1.3 – Толщина слоя и точность позиционирования по осям для различных SLA-установок

СЛ-установки	Толщина слоя, (мм)	Точность X-Y	Точность Z, (мм)
<b>SLA250</b>	0,075-0,15	Зависит от материала	0,025
<b>SLA3500</b>	0,05-0,15	Зависит от материала	0,005
<b>SLA5000</b>	0,05-0,15	Зависит от материала	0,013
<b>SLA7000</b>	0,0254-0,127	Зависит от материала	0,001
<b>STEREOS 400</b>	>0,1		0,05
<b>STEREOS MAX 600</b>	>0,05		0,07
<b>STEREOS Desktop S</b>	>0,05		0,07

Цифровых данных по точности по осям X и Y нет. Известно, что точность по этим осям зависит от материала. То есть, точность при использовании эпоксидных полимеров выше, чем при использовании акрилатных.

На рисунках 1.5-1.6 представлены примеры изделий, изготовленных с помощью стереолитографии.

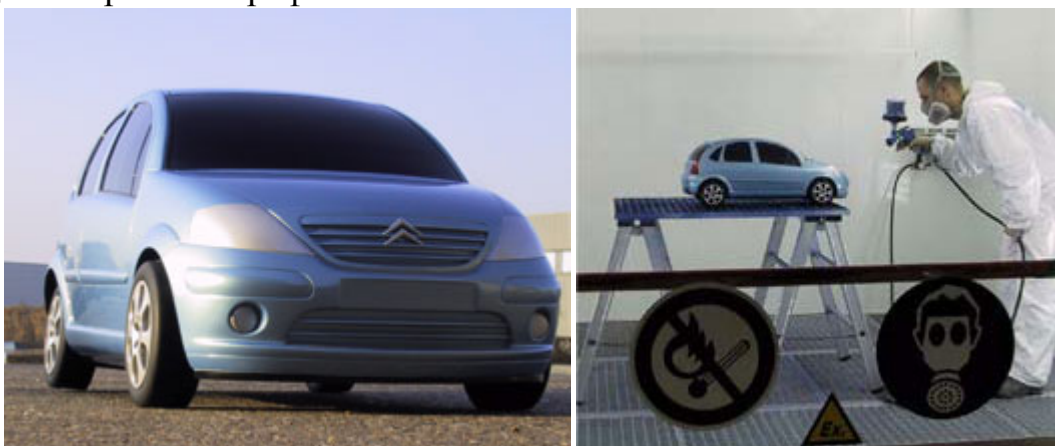


Рисунок 1.5 – Модель автомобиля Citroen C3 (масштаб 1:5), созданная в Citroen для отработки дизайнерских решений

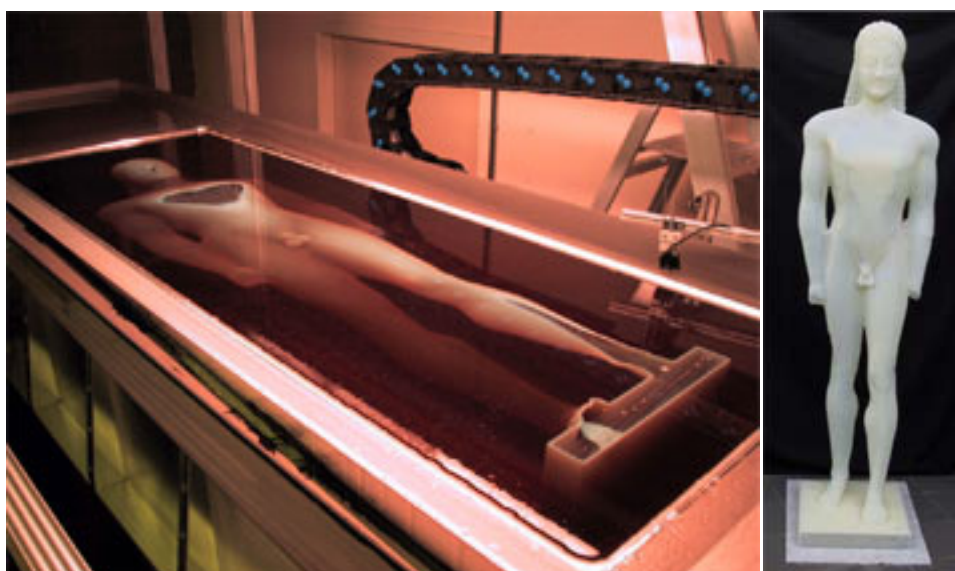


Рисунок 1.6 – Статуя в процессе создания внутри стереолитографического аппарата и готовое изделие

### 1.3 Аддитивные технологии с использованием тепловых процессов

Оборудование от DTM Corp., EOS, Helisys и Stratasys основано на тепловых реакциях и следующих основных технологиях:

- **Selective Laser Sintering** (SLS – лазерное спекание порошковых материалов), DTM Corp., EOS;
- **Laminated Object Manufacturing** (LOM – изготовление объектов с использованием ламинирования), Helisys;
- **Fused Deposition Modeling** (FDM – послойное наложение расплавленной полимерной нити), Stratasys.

#### 1.3.1 Технология SLS

При SLS-технологии (**Selective Laser Sintering** – лазерное спекание порошковых материалов) 3D объект создаётся из порошкообразных

материалов. Частицы порошка, диаметром 50-100 мкм, находящиеся в емкости, расплавляется под воздействием лазерного излучения. Лазерный луч, попадая на тонкий слой порошка, спекает порошковые частицы, которые затвердевают при охлаждении, формируя твёрдый слой. Подвижная платформа опускается. Сверху при помощи ролика наносится порошок, и процесс повторяется до полного изготовления прототипа. В данной технологии строящееся изделие не нуждается в подпорках (как, например, при стереолитографии), так как нерасплавленный порошковый материал остается лежать в камере, тем самым, обеспечивая необходимую поддержку. После построения, изделие полностью окружено неиспользованным материалом. Порошок очень осторожно удаляется только после полного застывания изделия, которое, в зависимости от материала, может длиться несколько часов (рисунок 1.7). После очистки изделие может быть подвергнуто дальнейшей обработке. Преимущество этого метода заключается в том, что наряду с пластмассами, можно изготавливать изделия из всех материалов, которые под воздействием тепла расплавляются, а затем при охлаждении вновь отверждаются.

Основными производителями установок для метода лазерного спекания порошковых материалов являются компании DTM Corp. (США) и EOS (Германия). Обе компании создают установки для изготовления изделий из пластмасс, металла и песка.

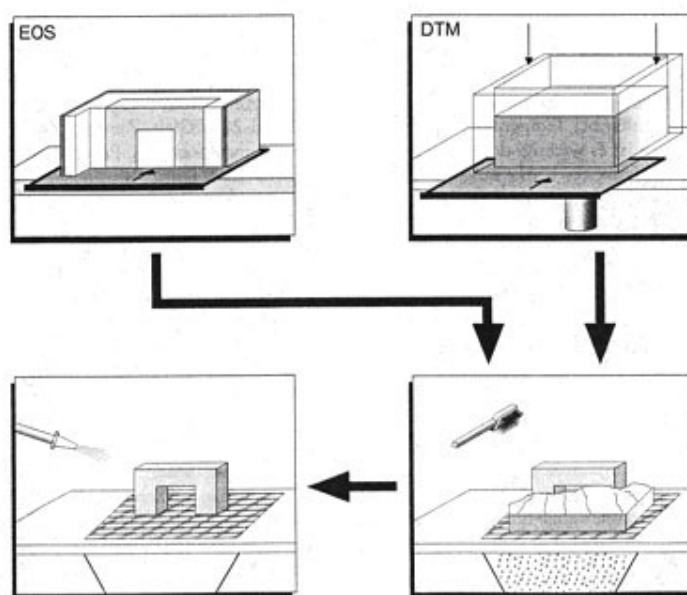


Рисунок 1.7 – Схематическое изображение процесса очистки модели

На рисунке 1.8 представлены SLS-установки Sinterstation 2500 и Sinterstation 2500Plus.



Рисунок 1.8 – SLS-установки: а) Sinterstation 2500; б) Sinterstation 2500Plus

### Точность изготовления

Двумя основными компаниями, занимающимися SLS-технологией, являются американская компания DTM и немецкая компания EOS.

Точность построения изделия зависит от его геометрии, а, следовательно, от позиционирования (размещения) строящегося изделия в рабочей камере. Также точность построения ограничена диаметром луча лазера.

При методе SLS используются два различных материала в виде порошка пластмассы или металла (рисунок 1.9). Например, полистирол, использующийся для изготовления изделий, может работать (расплавляться) при относительно низких температурах, что способствует незначительной усадке, и, следовательно, более высокой точности. А использование металлического порошка под названием DirectMetal, основанного на бронзе, позволяет обеспечивать размеры изделия с погрешностью, не превышающую 0,05 % от размера.

В таблице 1.4 представлены данные по точности изготовления изделий и толщине слоя в зависимости от типа установки.

Таблица 1.4 Точность изготовления изделий и толщина слоя в зависимости от типа установки

		Точность X-Y (мм)	Точность Z (мм)	Толщина слоя(мм)
<b>Sinterstation 2000</b>	компания DTM	0,01	0,01	0,05-0,3
<b>Sinterstation 2500</b>		0,01	0,01	0,05-0,4
<b>Sinterstation 2500plus</b>		0,01	0,01	0,05-0,5
<b>EOSINT P360</b>	компания EOS	0,05	0,05	0,1-0,2
<b>EOSINT P700</b>		0,05	0,05	0,15
<b>EOSINT S700</b>		0,05	0,05	0,2
<b>EOSINT M250</b>		0,05	0,05	0,05-0,1





Рисунок 1.9 – Неиспользованный материал и детали в аппарате сразу после создания

На рисунке 1.10 приведены примеры изделий, демонстрирующих возможности технологии SLS.



Рисунок 1.10 – Возможности SLS-технологии

### 1.3.2 LOM-технология

LOM – Laminated Object Manufacturing – изготовление слоистых моделей (рисунок 1.11). LOM-технология создания трехмерных изделий методом послойного склеивания элементов, вырезанных из листового материала. Изготовленные по LOM-технологии изделия идеально подходят для решения задач, требующих оценки формы и эстетических свойств изделий. Прочность LOM-объектов в большинстве случаев позволяет использовать их для проверки функциональности проектируемого изделия. Для изготовления изделий используется бумага или листовый пластик с нанесенным сухим связующим веществом. Изготовленные LOM-изделия по составу имеют сходство с древесиной и легко обрабатываются.

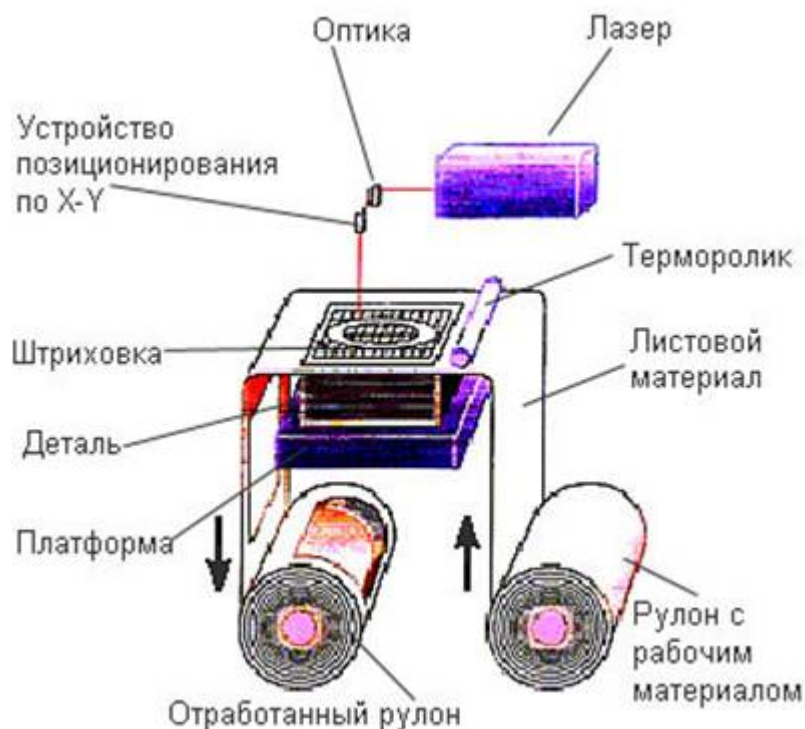
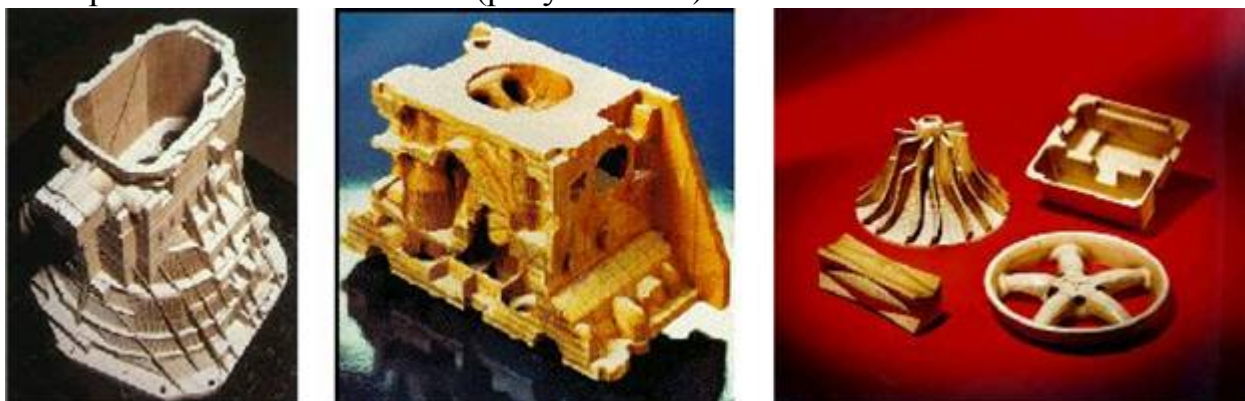


Рисунок 1.11 – Схема создания прототипа по LOM-технологии

С помощью специального программного обеспечения рассчитывается необходимое количество поперечных сечений изделия. Далее CAD-данные, содержащие информацию об изготовляемом изделии, транслируются в систему управления процессом LOM-машины. Материал из рулона подается на рабочую поверхность и лучом лазера вырезается контур поперечного сечения. Области лишнего материала разрезаются на мелкие элементы для последующего удаления. На рабочую поверхность подается материал для нового слоя и склеивается с предыдущим, за счет прокатки термораликом. После чего создается и вырезается новое поперечное сечение. После завершения изготовления всех слоев, лишний материал удаляется вручную. При необходимости выполняется чистовая обработка изделия (шлифовка, покрытие краской или лаком).

Благодаря использованию недорогих твердых листовых материалов, преимуществом LOM изделий является надежность, устойчивость к деформациям и предельно эффективная стоимость, не зависящая от геометрической сложности их (рисунок 1.12).





## Рисунок 1.12 – Примеры LOM-изделий

Владельцем технологии LOM и производителем оборудования является американская компания Helisys Inc., которая производит серии установок LOM Paper, LOM Plastic, LOM Composite, для различных типов расходного материала.

Установки LOM-1015plus и LOM-2030H – высокопроизводительные системы для изготовления слоистых моделей. Система моторов, управляющих перемещением лазера по осям X-Y, а также новый программный алгоритм позволяют сократить время построения изделия на 30%. Электромеханическая часть, изготовленная с учетом всех стандартов машиностроения, и отлаженная система управления значительно повышают уровень надежности системы. Благодаря упрощенным процедурам настройки и улучшенному механизму подачи материала, установки легки в управлении и эффективны в работе. На рисунке 1.13 представлены LOM-системы.



Рисунок 1.13 – Установки LOM. Слева – LOM-2300H, справа – LOM-1015plus

### Точность изготовления

Данные, представленные в таблице 1.5, свидетельствуют о том, что и фирма Helisys, производящая установки LOM, и сингапурская компания Kinergy, производящая установки Zipru, смогли добиться высокой точности изготовления изделий. Благодаря этому эти изделия, полученные с помощью LOM-технологии можно использовать для проверки собираемости изделий.

Также образцы, изготовленные данным методом, могут выступать в качестве разовых моделей для точного литья по выжигаемым моделям.

Таблица 1.5 – Значения точности установок

	Точность X-Y, (мм)	Точность Z, (мм)	Толщина слоя, (мм)
<b>LOM-1015</b>	0,025	0,05-0,2	0,05-0,2
<b>LOM-1015plus</b>	0,025	0,05-0,2	0,05-0,2
<b>LOM-2300</b>	0,025	0,05-0,2	0,05-0,2
<b>LOM-2300H</b>	0,025	0,05-0,2	0,05-0,2
<b>ZIPPY I</b>	0,01	0,01	0,15
<b>ZIPPY II</b>	0,01	0,01	0,15
<b>ZIPPY III</b>	0,01	0,01	0,15

### 1.3.3 FDM-технология

FDM (FDM – Fused Deposition Modeling) – процесс послойного наложения расплавленной полимерной нити. FDM-система позволит превратить концепцию изделия в реальный экземпляр, проверить его на соответствие форме и размерам и даже смоделировать работоспособность изделия, не прибегая к излишним временным и материальным затратам.

При помощи FDM-технологии можно создавать трехмерные объекты из твердотельных или поверхностных электронных моделей, полученных в CAD-системе. Термопластичный моделирующий материал в форме тонкой нити, диаметром 0,07 дюйма (1,78 мм), подается в экструзионную (выдавливающую) головку с системой регулировки температуры, где он разогревается до полужидкого состояния. Выдавливающая головка наносит материал очень тонкими слоями на неподвижное основание, формируя за один проход законченный слой изделия. Последующие слои наносятся на предыдущие, отвердевают, соединяются друг с другом (рисунок 1.14).

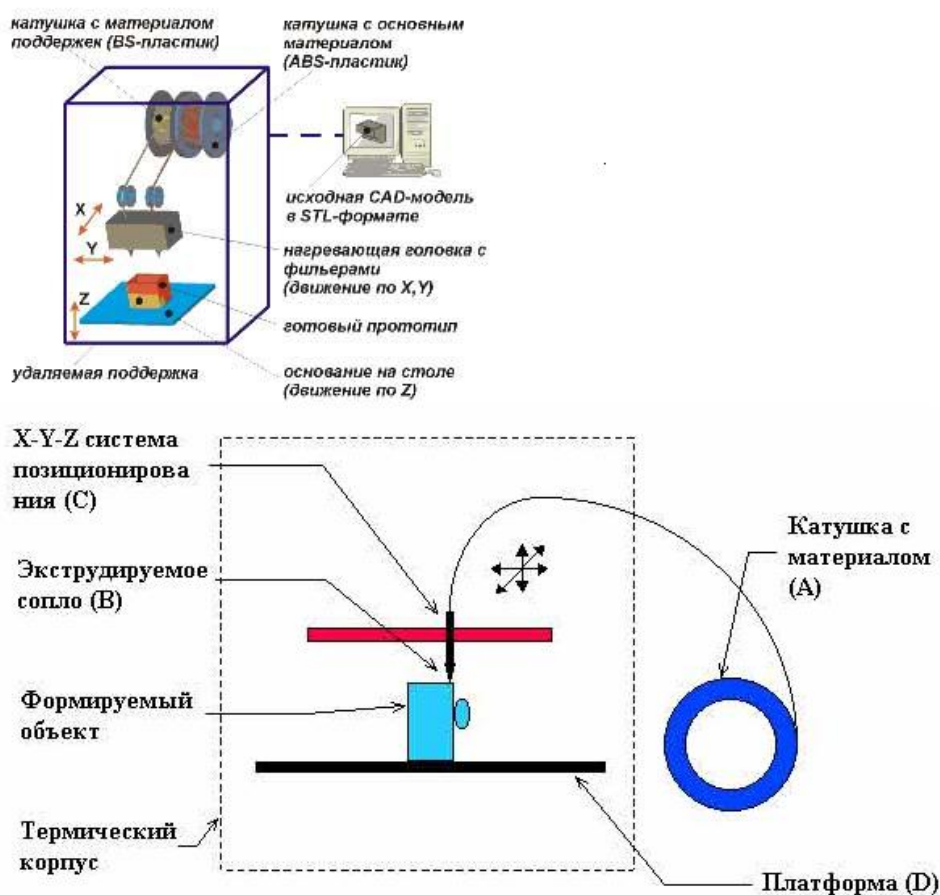


Рисунок 1.14 – Схема FDM-процесса

Процесс начинается с проектирования концептуальной геометрической модели на рабочей станции CAD-системы, а непосредственно процесс изготовления изделия – с программного обеспечения QuickSlice фирмы Stratasys, которое в течение нескольких минут обрабатывает stl-файл, математически разбивая концептуальную модель на горизонтальные слои – сечения. В случае необходимости с помощью программного обеспечения

SupportWorks автоматически формируются поддерживающие (опорные) структуры. При создании изделия используется два вида материала: первый (основной) – для формирования самого изделия, а другой – в качестве опорного (материал поддержки). Поддержка легко удаляется, оставляя чистую и гладкую поверхность раздела между поддержкой и изделием, что в результате даст превосходное качество законченного изделия. Траектория перемещения инструмента задается оператором простым нажатием соответствующей клавиши, и эти данные в цифровой форме вводятся затем в FDM-установку. Установка обеспечивает перемещение по осям X, Y и Z, при этом за один проход создается один слой изделия. Полученные таким способом изделия можно затем маркировать, шлифовать, красить, сверлить. Преимущество этого способа заключается в том, что существует огромная палитра материалов, позволяющая пользователю подбирать именно тот материал, который лучше всего соответствует его требованиям к изготавливаемому изделию. Кроме того, важен тот факт, что в процессе построения объекта можно изменять материал. Инсталляция FDM-системы исключительно проста – нужно всего лишь вставить вилку в розетку. Систему можно использовать в любом офисном помещении, поскольку не требуется никаких специальных условий работы (вентиляция, дополнительная инфраструктура или специальные разрешения). Все поставляется в виде законченного решения, которое позволяет конструкторскому коллективу быстрее проектировать, проверять и изготавливать свои изделия. Системы FDM имеют модульную конструкцию, что позволяет пользователям наращивать возможности системы по мере роста сложности изготавливаемых изделий. Базовая система любой модели включает все необходимые компоненты для изготовления изделий из материала одного типа (обычно из ABS-пластика). Существуют дополнительные модули, позволяющие расширять функциональные возможности системы благодаря использованию других типов моделирующих материалов – литьевой воск, специальный медицинский ABS-пластик, полиэстер (полиэфирный компаунд). Разработчиком технологии FDM и производителем оборудования является компания Stratasys. Фирма Stratasys была основана в 1988 году и является одним из первых производителей изделий. В установках FDM 1000/1500/1600 систематически увеличивался размер камеры, где происходит построение изделий, что дало возможность изготавливать их большего размера. Новая установка FDM (рисунок 1.15), представленная компанией Stratasys, имеет камеру, позволяющую изготавливать изделия наибольших размеров.



Рисунок 1.15 – Установки FDM: а) FDM Quantum, б) FDM 2000, в) FDM 3000

Появление новой установки FDM Quantum открыло новые возможности в изготовлении изделий. Эта установка позволяет быстро и точно создавать функциональные образцы больших размеров и их элементов из ABS-пластика. Скорость построения изделия и простота использования установки FDM Quantum позволяют изготавливать его в течение нескольких часов (в зависимости от размера этого изделия). Прочность и долговечность изделий, изготовленных на установке FDM Quantum из ABS-пластика, позволяют собирать из них конструкции для проверки их функциональности. Эти изделия сохраняют свои геометрические параметры неограниченное время, независимо от влажности, наличия или отсутствия ультрафиолетового или магнитного излучения и выдерживают нагрев до 150 С. Точность изготовления изделий составляет  $\pm 0,127$  мм. Применение новой технологии WaterWorks, позволяющей использовать вымываемый материал поддержки, дает неограниченные возможности построения изделий со сложной внешней и внутренней геометрией. Применение экологически чистых технологий и материалов для изготовления изделий, позволяет избежать временных и денежных затрат на создание специальных условий для эксплуатации установки FDM Quantum и размещать ее в непосредственной близости от рабочих мест конструкторов. В таблице 1.6 приведены основные характеристики оборудования от Stratasys.

Таблица 1.6 – Основные характеристики оборудования от Stratasys

	<b>FDM 2000</b>	<b>FDM 3000</b>	<b>FDM 8000</b>	<b>FDM Quantum</b>
<b>Размер формируемой детали</b>	254x254x254 мм	254x254x406 мм	457x457x609 мм	600x500x600 мм
<b>Толщина слоя</b>	0,254-2,54 мм/ 0,05-0,762 мм	0,254-2,54 мм/ 0,05-0,762 мм	0,254-2,54 мм/ 0,05-0,762 мм	0,38-0,51 мм/ 0,18-0,25 мм
<b>Точность</b>	0,1 мм	0,1 мм	0,1 мм	0,1 мм
<b>Материалы</b>	ABS ABSi литьевой воск E20-эластомер	ABS ABSi	ABS ABSi E20-эластомер	ABS

Технологии и оборудование Stratasys используют следующие компании: DaimlerChrysler, Hewlett-Packard, Mercedes Benz St., General Motors, Ford, Kodak, Boeing, Motorola, Xerox, Rowenta, Lockheed Martin и др.

#### **Точность изготовления**

Изделия, изготовленные по технологии FDM, имеют достаточную прочность для того, чтобы оценить их формы и провести сборку конструкции. Для этого также необходима высокая точность изготовления. Анализируя нижеприведенную таблицу 1.7, можно сказать, что наивысшую точность дает одна из последних, выпущенных на рынок установок, – FDM Quantum. Точность по осям X и Y составляет 0,01 мм. Образцы, изготовленные с такой

точностью, можно также использовать и в качестве литейных моделей, например, для вакуумного литья пластмасс при малых и средних объемах производства. На рисунке 1.16 приведены примеры изделий сложного профиля, созданных с помощью технологии FDM.

Таблица 1.7 – Значения точности установок

	Точность X-Y, (мм)	Точность Z, (мм)	Толщина слоя, (мм)
<b>FDM 1650</b>	0,025	0,1	0,05-0,762
<b>FDM 2000</b>	0,025	0,1	0,05-0,762
<b>FDM 3000</b>	0,025	0,1	0,05-0,762
<b>FDM 8000</b>	0,025	0,1	0,05-0,762
<b>FDM Quantum</b>	0,01	0,1	0,18-0,25



Рисунок 1.16 – Сложное изделие с импеллером и модель электроробзика, созданные при помощи технологии FDM

### 1.3.4 Трехмерная печать (3D Printers)

В своем большинстве системы аддитивных технологий являются громоздкими и дорогостоящими установками. Небольшие компании не могут себе позволить их приобрести. Поэтому они заказывают свои изделия на фирмах, специализирующихся на этих технологиях или услугах по АТ. Некоторые крупные компании покупают одну или две аддитивных установки, которые используются различными службами, что приводит к задержке изготовления изделий. Для многих специалистов, которые занимаются концептуальным проектированием и которым необходимо только взглянуть на конструкцию и затем продолжить разработку, очень важен фактор быстрого, недорогого и простого получения прототипов проектируемых изделий. Для той трети рынка АТ, которой требуются прототипы для визуальной оценки, начали производиться так называемые "принтеры твердотельных объектов" (Three Dimentional Printer – 3D Printer) – системы, которые строят физические изделия движением материала из одной или нескольких струйных головок, подобно обычному принтеру. Примеры изделий, изготовленные на таких установках, показаны на рисунке 1.17.





Рисунок 1.17 – Примеры прототипов, изготовленных на 3D принтерах

Как и традиционные аддитивные машины, 3D принтеры изготавливают физические модели, основанные на CAD-модели, используя, в основном, технологии струйного моделирования и технологии использования для формирования изделия порошка, который затвердевает при помощи связывающего вещества на водной основе (рисунок 1.18).

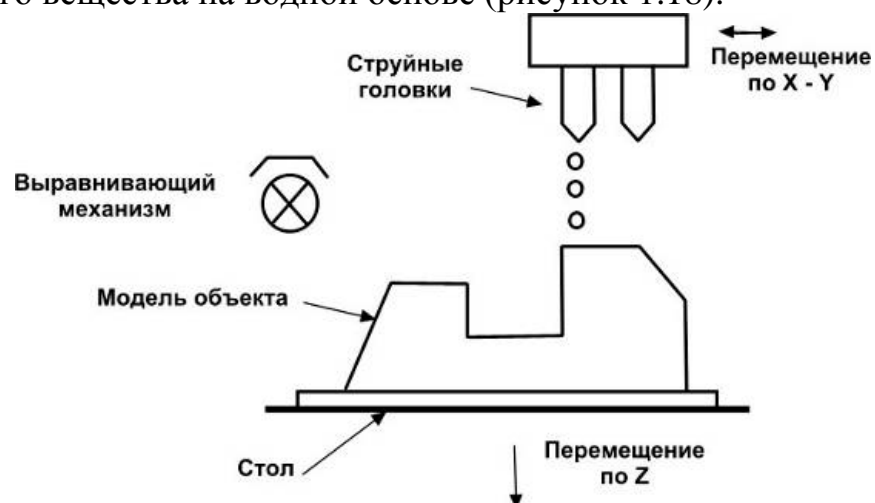


Рисунок 1.18 – Технология построения детали 3D принтером

Обычно 3D принтеры не дают высокой точности и прочности готового прототипа, однако механических свойств таких прототипов достаточно для визуализации разрабатываемого изделия (рисунок 1.17). Стоимость таких установок колеблется от 35000 до 50000 долларов (рисунок 1.19), тогда как цена традиционных аддитивных систем начинается с 65000 долларов и доходит до 800000 долларов. Стоимость прототипов, изготовленных на 3D принтерах составляет от 15 до 35 долларов.

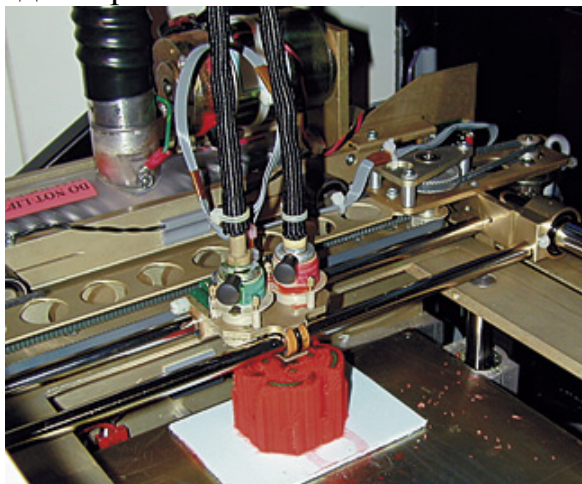


Рисунок 1.19 – Внешний вид печатающей каретки 3D принтера

3D принтеры более доступны, так как для их размещения не требуется специальных приспособлений и помещений, они могут размещаться непосредственно в офисе, у рабочего места конструктора. Кроме этого, 3D принтеры не используют вредные материалы или процессы. Средняя область построения для 3D принтеров составляет куб со сторонами 203 мм.

Рассмотрим 3D-принтеры от 3D Systems, Stratasys и ZCorporation. Простейший из процессов "струйной" объемной печати – это так называемый Fused Deposition Modeling (FDM).

Идея FDM очень проста – раздаточная головка выдавливает на охлаждаемую платформу-основу капли разогретого термопластика (в качестве материала может использоваться практически любой промышленный термопластик). Капли быстро застывают и слипаются друг с другом, формируя слои будущего объекта (печать здесь тоже ведется по слоям). Техпроцесс FDM позволяет с достаточно высокой точностью (минимальная толщина слоя 0.12 мм) изготавливать полностью готовые к использованию изделия довольно большого размера (до 600 x 600 x 500 мм). Основы этой технологии были разработаны еще в 1988 Скоттом Крампом (Scott Crump).

#### **1.3.4.1 Принтеры Genisys**

Этот принтер изготавливает относительно прочные изделия, используя разновидность технологии FDM (Fused Deposition Modelling). Этот процесс включает в себя нагревание термопластического материала до температуры плавления и его выдавливание для формирования изделия.

Genisys предоставляет возможность расположения нескольких изделий одно в другом или одновременное размещение нескольких изделий в рабочей области. Это удобно при изготовлении нескольких вариантов изделий в одно и тоже время. Программное обеспечение – AutoGen – соответствующим образом позиционирует 3D модель, послойно её разбивает, формирует поддержку (при необходимости) и начинает изготовление простой операцией "point and click" – "укажи и щёлкни мышью".

Размер формируемого изделия: 305x203x203 мм.

Скорость изготовления: 101 мм/сек.

Толщина слоя составляет 0.014 дюйма (0.36 мм).

Точность изготовления 0.356 мм.

Стоимость в США около 55000 долларов.

На рисунке 1.20 представлено изделие, изготовленное на FDM принтере на его фоне.

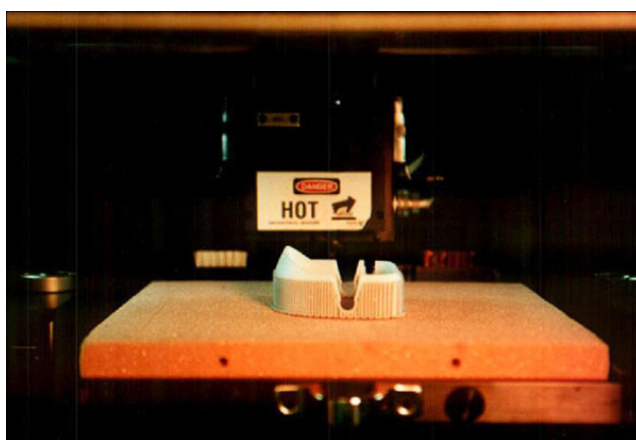


Рисунок 1.20 – Изделие, изготовленное на FDM принтере.

В таблице 1.8 представлены технические характеристики аддитивных установок фирмы Stratasys, Inc.

Таблица 1.8 – Технические характеристики аддитивных установок фирмы Stratasys, Inc

Модель	Genisys Xs	Prodigy	FDM2000/ 3000	FDM Titan	FDM8000	FDM Maxum
<b>Размер формируемой модели (X×Y×Z), мм</b>	305×203×203	201×203×305	254×254×254/406	355×406×406	457×457×609	600×500×600
<b>Точность изготовления модели, ± мм</b>	0,356	0,254	0,127	0,127	До 0,127	До 0,127
<b>Программная совместимость</b>	Windows NT	Windows NT	Windows NT	Windows NT, 2000	Windows NT	Windows NT
Продолжение таблицы 1.8						
<b>Моделиру-</b>	Полиэстер	ABS-	ABS-	ABS-	ABS-	ABS-



Ющие материалы		пластик	пластик, ABSi-пластик, эластомер E20, литьевой воск ICW	пластик, поликарбонат, полифенилсульфон	пластик	пластик
Габариты установки (ширина×высота×глубина), мм	914×737×816	864×686×1041	660×1067×914	1270×876×1981	1486×1905×1003	2235×1981×1118
Масса установки, кг	95	128	160	726	392	1134

### 1.3.4.2 Принтеры Z Corporation

И еще одна технология "струйной печати", но с использованием порошковых материалов. Разработана она была в знаменитом Массачусетском Технологическом Институте. Её 3D принтеры работают существенно быстрее вышеописанных устройств. Этот принтер может использовать клеящую жидкость с добавлением пигментных красителей – а значит, печатать цветные модели. В цветном принтере от Z Corporation установлены 4 струйные головки с чернилами-клеем основных цветов, так что полученная модель может воспроизводить не только форму, но и окраску (то есть, текстуру) своего виртуального прототипа.

Компании, использующие принтеры от Z Corporation: Ford, Benteler, F1 Racing, Porsche, Lockheed Martin, Mitre, Adidas, Nike, Black & Decker, Robert Bosch и другие.

На рисунке 1.21 представлена работа трехмерного принтера.



Рисунок 1.21 – Принцип работы 3D принтера.

В принтере имеются 2 камеры: подающая камера и камера, в которой формируется изделие. Перед работой принтера оператор засыпает порошок в подающую камеру, поршень которой опущен полностью вниз. Поршень второй камеры поднят в это время до упора вверх. После этого запускается специальная функция, которая автоматически наносит несколько слоев порошка из подающей камеры в зону печати и выравнивает уровни порошка в обеих камерах. Теперь 3D принтер готов к работе. Во время очередного цикла печати формируется одно сечение изделия (разбиение изделия на сечения происходит автоматически при помощи управляющего программного обеспечения ZPrint). Сечение печатается так же, как и в обычном струйном принтере с той лишь разницей, что вместо бумаги – тонкий слой порошка, а вместо чернил – связующее вещество. После того как сечение изделия напечатано, каретка перемещается в подающую зону, поршень с изделием опускается на толщину одного слоя, а подающий порошок поршень поднимается на толщину одного слоя. После этого ролик каретки, перемещаясь обратно, наносит очередной слой порошка в зону печати, и цикл повторяется. По окончании работы принтера изделие извлекается из порошка (в тех местах, где не было нанесено связующее вещество, порошок остался рассыпчатым) и помещается в специальную установку для удаления остатков порошка с изделия (установка для удаления порошка). Патентованное программное обеспечение Z Corporation's работает с трехмерными моделями в форматах STL, VRML и PLY. Программное обеспечение ZPrint позволяет просматривать 3D модели, наносить текст на изделия и масштабировать изделия. Совместимо с операционными системами Windows 2000 Professional и Windows XP Professional.

Гипсовые модели получаются не очень прочными, но их сразу можно использовать в качестве форм для литья. Напечатанные изделия могут быть обработаны эпоксидной смолой Z-Max для существенного увеличения их прочности, теплостойкости и влагостойкости. Дополнительная прочность изделий позволяет их обрабатывать на станках. Таким образом, они могут совместно работать с промышленными изделиями. Что касается детализации "отпечатка", то достаточно посмотреть на приведенные фотографии, чтобы ее оценить (рисунок 1.22). Так как принтер имеет небольшие габариты и вес, а также не использует в работе вредных материалов, то он может быть установлен непосредственно на рабочем месте конструктора, как и обычный принтер, и, при необходимости, может быть быстро доставлен в любое место.



Рисунок 1.22 – Изделия, изготовленные на 3D принтере

#### 1.3.4.3 Принтер Z 402 (ZCorporation)

В этом процессе машина распределяет слой порошка по поверхности рабочей ёмкости. В качестве строительного материала используется специальный крахмально-целлюлозный порошок. Жидкий клей на водяной основе, поступаая из 128-струйной головки, связывает частицы порошка, формируя контур одного сечения модели. Затем рабочая ёмкость опускается на толщину одного слоя; по всему объёму ёмкости, в том числе и по предыдущему слою, распределяется новый слой порошка, инжекционная головка очерчивает контур следующего сечения, и т.д. После окончания построения излишки порошка удаляются. Для увеличения прочности модели имеющиеся пустоты могут быть заполнены жидким воском. Скорость является основным отличием этого принтера. Он изготавливает модели по крайней мере в 10 раз быстрее, чем самые быстрые конкурирующие системы. Изделие может быть изготовлено в период времени от нескольких минут до нескольких часов. Размер формируемого изделия: 203x254x203 мм, вес: 136 кг.

Принтер Z 402 (ZCorporation) представлен на рисунке 1.23.



Рисунок 1.23 – Конструкция принтера Z 402

#### 1.3.4.4 ZPrinter 310 Plus

Система ZPrinter 310 Plus создает физические модели непосредственно по цифровым данным за считанные часы, а не дни. Система быстра, универсальна и проста, она предоставляет инженерам возможность быстро и дешево создавать концептуальные модели и проводить функциональные тесты изделий. Скорость печати: 2-4 слоя в минуту.

Размер формируемой детали: 203 x 254 x 203 мм. Толщина слоя: выбирается пользователем во время печати; 0.089-0.203 мм. Используемые материалы: высококачественные композитные материалы, резиновые материалы, пластичные материалы, материалы для непрерывного литья и литья по выплавляемым моделям. Габариты оборудования: 74 x 81 x 109 см. Стоимость 33400 долларов.

ZPrinter 310 Plus представлен на рисунке 1.24.



Рисунок 1.24 – Конструкция принтера ZPrinter 310 Plus

#### 1.3.4.5 Принтер ZPrinter 510 System

Более качественная технология печати дает возможность создавать изделия с четко определенными свойствами повышенной точности. Эта уникальная возможность 3D печати с 24-битным цветом обеспечивает получение разнообразных моделей. Скорость печати: 2 слоя в минуту. Размер формируемого изделия: 254 x 356 x 203 мм. Толщина слоя: выбирается пользователем во время печати: 0.089-0.203 мм. Используемые материалы: высококачественные композитные материалы, материалы для непрерывного литья. Разрешение: 600 x 540 dpi. Габариты оборудования: 107 x 79 x 127 см. Вес оборудования 204 кг.

Принтер ZPrinter 510 System представлен на рисунке 1.25.





Рисунок 1.25 – Общий вид принтера ZPrinter 510 System

#### 1.3.4.6 Принтер ZPrinter 810 System

Более качественная технология печати дает возможность создавать изделия с четко определенными свойствами повышенной точности. Эта уникальная возможность 3D печати с 24-битным цветом обеспечивает получение разнообразных моделей. Скорость печати: 2 слоя в минуту. Размер формируемой детали: 500 x 600 x 400 мм. Толщина слоя: выбирается пользователем во время печати: 0.089-0.203 мм. Используемые материалы: высококачественные композитные материалы, материалы для непрерывного литья и литья по выплавляемым моделям. Разрешение: 600 x 540 dpi. Габариты оборудования 241 x 114 x 193 см. Вес оборудования 565 кг.

Принтер ZPrinter 810 System представлен на рисунке 1.26.



Рисунок 1.26 – Общий вид принтера ZPrinter 810 System и примеры изготовленных на нем моделей

#### 1.3.4.7 Принтер Objet Geometries Ltd (Израиль)

Принтер Objet Geometries Ltd (Израиль) представлен на рисунке 1.27.

Этот прибор, при сравнительной простоте и дешевизне, обеспечивает изготовление прототипов, сравнимых по качеству со стереолитографическими моделями. Установка Objet Quadra менее требовательна к рабочему помещению и квалификации обслуживающего персонала. Как и в стереолитографии, модель выращивается из специального светоотверждаемого пластика, но засветка производится ультрафиолетовыми лампами, а "поддержки" формируются из материала, отличного от основного, чем обеспечивается легкость их удаления. Установка подключается в локальную сеть, по которой в нее передаются данные из САД-программы. Принцип действия принтера Objet Quadra заключается в следующем: тело физической модели печатается по компьютерной 3D-модели послойно, специальной струйной головкой, содержащей 1536 сопел (рисунок 1.28), при этом тело модели печатается основным материалом, а вспомогательные элементы ("поддержки") – другим, менее прочным и более рыхлым. Оба материала отверждаются ультрафиолетовыми лампами. После печати каждого слоя рабочий стол, на котором выращивается модель, опускается на толщину слоя. В завершение процесса вспомогательные элементы вымываются струей воды.



Рисунок 1.27 – Общий вид принтера Objet Geometries и примеры изготовленных на нем изделий

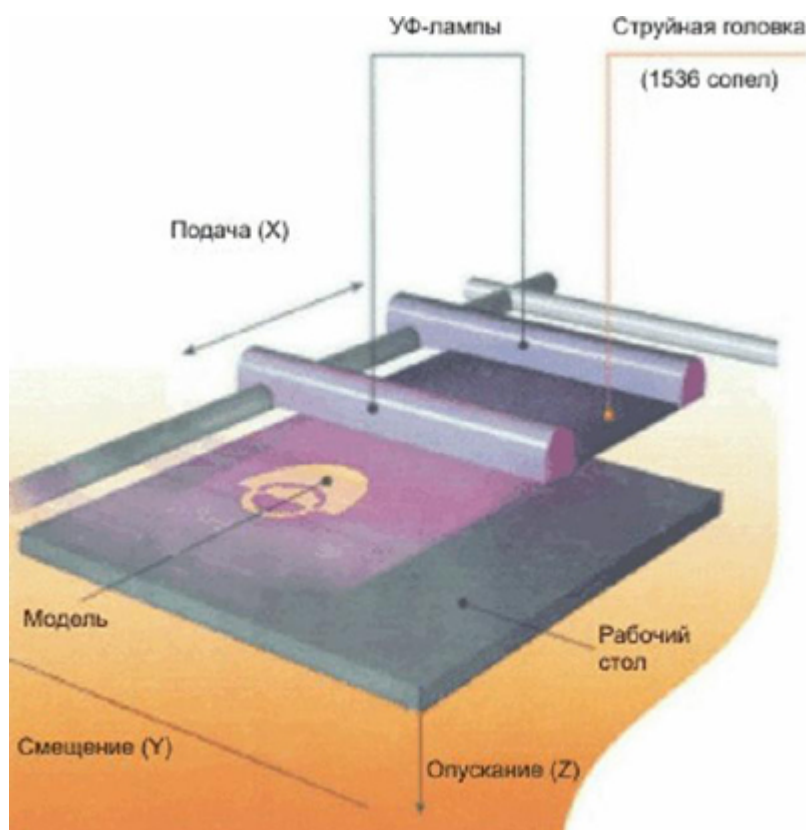


Рисунок 1.28 – Схема работы принтера Objet Geometries

#### 1.3.4.8 Принтер Eden250™

Размер формируемого изделия: 250х 250 х 200мм. Разрешение: X: 600 dpi: 42 мкм, Y: 300 dpi: 84 мкм, Z: 1600 dpi: 16 мкм. Толщина стенки до 0,6 мм. Габариты оборудования 870 х 740 х 1200мм. Вес оборудования 280 кг. Тип входных данных STL, SLC.

Принтер Eden250™ представлен на рисунке 1.29.



Рисунок 1.29 – Общий вид принтера Eden250™

#### 1.3.4.9 Принтер Eden330™

Размер формируемого изделия: 340 х 330 х 200мм. Разрешение: X: 600 dpi: 42 мкм, Y: 300 dpi: 84 мкм, Z: 1600 dpi: 16 мкм. Толщина стенки до 0,6 мм.

Габариты оборудования: 1320 x 990 x 1200мм. Вес оборудования: 400 кг. Тип входных данных STL, SLc.

Принтер Eden330™ представлен на рисунке 1.30.



Рисунок 1.30 – Общий вид принтера Eden330™

#### 1.3.4.10 Принтер InVision™ HR

InVision™ HR — доступный, надёжный, простой в использовании принтер трёхмерного моделирования с высоким разрешением (HR) специально разработан для быстрого изготовления моделей высочайшей точности. Скорость построения: 2,5 мм. Разрешение 656 x 656 x 800 точек на дюйм. Рабочая зона 127x178x50mm (хуз). Габариты 770 x 1240 x 1470 мм. Масса 254 кг. Материал: синий цвет материала VisiJet HR M100 позволяет точно оценить качество поверхности модели. Температура плавления материала 90°C. Готовую модель можно помещать в жидкую двухкомпонентную резину или сразу формовать. Поддерживаемый материал – VisiJet S100 — воск белого цвета. Температура плавления 70°C – легко удаляется даже под горячей водой.

Принтер InVision™ HR представлен на рисунке 1.31.



Рисунок 1.31 – Общий вид принтера InVision™ HR



В ближайшее время компания выпустит на рынок новую модель. Основная особенность новинки – повышение скорости работы на 30%. Принтер "выстраивает" сложные геометрические формы при помощи процессов наплавления, маскирования и подрезки слоев специального пластика VisiJet. После создания, объекты не требуют окончательной обработки.

Сравнительно невысокая стоимость – 22900 долларов – позволяет InVision LD оставаться одним из самых доступных инструментов в своем классе (рисунок 1.32).



Рисунок 1.32 – Общий вид нового принтера InVision

#### **1.3.4.11 Принтеры фирмы Contex**

Струйная печатающая головка распределяет жидкий клеевой состав на водной основе – этот состав склеивает порошок, формируя слои будущей модели. Клей, поочередно поступающий в каждую печатающую головку, распределяется в соответствии с заданной программой и застывает сразу после нанесения. По завершении формирования одного уровня вращающаяся головка проверяет его толщину и приступает к работе над следующим.

Трехмерные принтеры Contex отличаются от аналогичных разработок других компаний доступностью, высоким разрешением, а также выверенной точностью создания модели. Трехмерная модель создается в 5-10 раз быстрее, чем при использовании других технологий, причем ни одно из альтернативных решений не обеспечивает столь низкой себестоимости работ. Возможности 24-битной передачи цвета (рисунок 1.33).



Рисунок 1.33 – Общий вид принтера Contex DESIGNmate Mx

### **1.3.5 Обычное практическое применение аддитивных технологий**

АТ предоставили новые возможности развития производства [2]. За последние несколько лет произошли существенные изменения в новых технологиях, которые повлияли на то, как промышленность может использовать эти технологии в точном литье по выжигаемым моделям для быстрого изготовления функциональных металлических образцов и как ключевой шаг в быстром изготовлении оснастки. Уже на ранней стадии развития стереолитографии стало ясно, что эта революционная технология может найти различные применения в производственных процессах. На стадии концептуального проектирования наличие физического трехмерного объекта значительно облегчает оценку правильности конструкции, а также упрощает сам процесс общения между членами коллектива, работающими над проектом. Ранее стереолитографические объекты, создаваемые из фотополимерных материалов, по своим физическим и механическим характеристикам не соответствовали промышленным материалам. Следовательно, хотя эти модели и позволяли проводить контроль размеров и геометрии, проверку и оптимизацию конструкции, но возможности функциональной проверки прототипов были ограничены. В связи с этим несколько лет назад многие пользователи технологии стереолитографии начали искать пути, позволяющие устранить эти ограничения.

#### **1.3.5.1 QuickCast. Литье по выжигаемым стереолитографическим моделям**

Для изготовления металлических деталей фирмой 3D Systems был разработан новый стиль построения моделей, названный QuickCast, исключая необходимость использования дорогостоящей и трудоемкой

оснастки (рисунок 1.34). Стиль построения QuickCast заключается в создании внутренней открытой решетчатой структуры, состоящей из множества связанных перегородок. Решетчатая внутренняя структура покрыта тонкой оболочкой, чтобы не проникала жидкая керамика. Стереолитографическая модель используется совместно со стандартной литниковой системой, изготовленной из литейного воска. После изготовления оболочковой формы из керамики восковая литниковая система выплавляется на начальном этапе отжига оболочковой формы, при котором еще не происходит разрушение стереолитографической модели. Обжиг оболочковой формы производится при температуре приблизительно 900°C. Во время этой операции стереолитографическая деталь сначала размягчается, а затем выжигается, оставляя приблизительно 0,003% остаточной золы. Затем зола удаляется сжатым воздухом, и керамическая оболочковая форма готова к заливке металла. Металл заливается в керамическую оболочковую форму и охлаждается. Затем оболочка разрушается, удаляются литники и обычно все завершается зачисткой, пескоструйной обработкой, фрезерованием и т.д. Конечный результат – это точная металлическая отливка, созданная из модели, изготовленной по технологии стереолитографии, минуя традиционную дорогостоящую технологическую оснастку.



Рисунок 1.34 – Схема технологического процесса литья по выжигаемым моделям

Основные преимущества этого процесса:

- возможность точного литья металла по выжигаемым моделям, полученным без какой-либо оснастки;
- значительная экономия времени (отсутствует этап изготовления оснастки);
- значительная экономия средств (исключены затраты на изготовление оснастки);
- возможность проведения функциональных испытаний на отливках из необходимого металла;
- быстрое появление новых изделий на рынке дает фирмам преимущества в конкурентной борьбе;
- возможность изготовления небольших серий металлических деталей.

### **1.3.5.2 Литье в эластичные силиконовые формы в вакууме**

Литье в вакууме в эластичные формы – это процесс получения опытных образцов и небольших партий пластмассовых и восковых изделий любой сложности и габаритов без изготовления стандартной оснастки. Благодаря использованию широкой гаммы материалов, отливаемые копии могут быть эластичными, жесткими, термостойкими, прозрачными или различных цветов. Принцип изготовления изделий по технологии литья в эластичные формы заключается в абсолютно точном копировании модели. Форма изготавливается заливкой полимеризующегося силикона вокруг модели. Модель удаляется из силиконовой формы после надреза формы по разделительной плоскости. Далее в силиконовую форму можно залить любую из имеющихся в широкой номенклатуре двухкомпонентных полиуретановых смол. Литьевые смолы смешиваются в вакуумной камере установки, управляемой компьютером, и автоматически заливаются в силиконовую форму. Возможность воспроизведения сложных форм, мельчайших деталей, любой текстуры поверхности и цвета обеспечивают смолы для литья в вакууме, имеющие различную твердость и термостойкость, что позволяет имитировать большинство пластмасс, резин и стекол, используемых в современном производстве.

Технология литья в силиконовые формы в вакууме позволяет:

- проверить собираемость и работоспособность конструкций;
- отработать дизайн изделия;
- изготовить партию опытных образцов в течение нескольких часов после изготовления силиконовой формы;
- провести маркетинговые исследования.

Основные преимущества при применении:

- сложные поверхности, мельчайшие детали и любые текстуры полностью воспроизводятся эластичной силиконовой формой;
- опытные образцы могут быть готовы уже через несколько дней;
- можно использовать различные материалы для получения копий и оценить их конструкцию и потребительские свойства до изготовления серийной оснастки;

– высокая точность изготовления образцов позволяет реально оценить собираемость и работоспособность сложных изделий и при необходимости быстро осуществить соответствующие доработки;

– различные варианты окраски образцов, изготовленных в одной форме, позволяют уточнить внешний вид изделия.

Несмотря на описанные выше преимущества технологии литья в вакууме, ей присущи и недостатки.

С помощью силиконовых форм можно изготовить лишь ограниченное число деталей. В одной форме можно отлить до 20 прототипов деталей, не имеющих тонкостенных элементов. Однако для деталей, имеющих более сложную геометрию с острыми элементами, в одной форме можно отлить максимум 10 копий. Силиконовая форма изготавливается за очень короткое время – приблизительно за шесть часов после получения стереолитографической модели. Однако для получения полиуретановой копии требуется гораздо больше времени. Как правило, в день можно изготовить 4-8 деталей. Проблемы нет, если требуется только несколько прототипов. Однако, если необходимо изготовить 50-100 прототипов для проведения испытаний с разрушением образцов или для изучения рынка сбыта, то, хотя на изготовление нескольких форм потребуется и немного времени, но на получение копий нужно будет несколько недель.

### **1.3.5.3 Промежуточная оснастка**

В том случае, когда требуются 20-100 изделий и необходимо, чтобы они были отлиты под давлением из промышленной пластмассы, эластичная оснастка не подходит. В то же время, при изготовлении нескольких сотен или нескольких тысяч изделий, невозможно окупить затраты на серийную стальную оснастку. Эту задачу можно решить с помощью так называемой "промежуточной оснастки", которая используется в тех случаях, когда применение серийной оснастки экономически нецелесообразно, а эластичная оснастка не позволяет изготавливать изделия, которые по характеристикам аналогичны изделиям, изготавливаемым литьем пластмасс под давлением.

Компания 3D Systems и другие фирмы интенсивно работали над созданием промежуточной оснастки. Один из наиболее эффективных способов – литье под давлением в формы, построенные непосредственно из стереолитографического полимера. При изготовлении изделий таким методом есть некоторые особенности. Необходимо обратить внимание на время цикла при работе с оснасткой. Очень важно не пытаться слишком быстро разнимать форму. Опыт показал, что разрушение форм, изготовленных из полимера, происходит не в процессе литья, а возникают как раз во время извлечения отливки из пресс-формы. Поэтому более длительный цикл позволяет обеспечить лучшее остывание залитой пластмассы, уменьшая прилипание отливки к полимерной вставке.

Другим моментом, представляющим интерес, является использование антиадгезивов для пресс-форм. Антиадгезив необходимо наносить на

формообразующие поверхности перед каждым циклом впрыск/извлечение. Без этого отливка будет прилипать к формообразующей поверхности и при ее извлечении на форме могут появиться трещины и сколы. В дальнейшем, при отливке изделий на их поверхности будут воспроизведены эти дефекты.

Третий ключевой момент – необходимость литейного уклона. Даже для стандартной стальной оснастки требуется небольшой литейный уклон порядка  $0,5-1^\circ$  для извлечения изделия. Чем лучше отполирована оснастка, тем меньший требуется литейный уклон. И, если литейный уклон отсутствует, есть большая вероятность того, что отливка не будет сниматься. Если форма изготовлена из стали, то будет повреждена отливка, если форма выполнена из стереолитографического полимера, то будет разрушена форма.

Основное преимущество такого способа изготовления формы состоит в том, что формообразующие пуансоны и матрицы изготавливаются непосредственно на установке стереолитографии. Следовательно, никакие вспомогательные процессы, за исключением очистки стереолитографической модели, удаления элементов поддержки, пескоструйной обработки и полировки, не требуются.

Однако существуют и недостатки. Удельная теплопроводность отвержденных стереолитографических полимеров приблизительно в 300 раз ниже, чем у стандартной инструментальной стали, что значительно снижает скорость передачи тепла от пластмассового изделия к оснастке. Поэтому рекомендуемый цикл составляет 4-5 мин., в отличие от стандартного цикла 5-15 сек. для литья под давлением с использованием стальной оснастки. Для построения крупных форм на установке стереолитографии может потребоваться 30-40 часов, хотя это и немного по сравнению с месяцами, необходимыми для изготовления традиционной оснастки. Стереолитографические формы имеют невысокую механическую прочность, особенно при высоких температурах литья под давлением. Как указывалось ранее, повреждение оснастки часто возникает при извлечении отливки, особенно, если сокращено время цикла, неправильно задан литейный уклон, недостаточно отполированы формообразующие поверхности (ступенчатая поверхность увеличивает трение), или, если использовался недостаточно эффективный антиадгезив для пресс-формы. Поверхность оснастки имеет относительно низкую твердость и малую прочность. Если необходимо изготовить 30-100 штук изделий из пластмассы без наполнителей, то это не имеет значения, но для серии от 200 до 1000 изделий или для изделий из стеклонаполненного пластика стойкость оснастки может быть недостаточна из-за разрушения поверхности формы. На рисунке 1.35 проиллюстрирован один из вариантов решения вышеперечисленных проблем. В этом случае вместо построения монолитной формообразующей, на стереолитографической установке строится относительно тонкая оболочка. Чем тоньше стенки, тем меньше время построения и выше скорость теплопередачи. Однако, если оболочка слишком тонкая, то её можно повредить в процессе изготовления пресс-формы. Оптимальная толщина зависит от механических свойств

используемого полимера, его термостойкости, а также от геометрии формообразующей поверхности. После построения оболочек, их очистки, удаления элементов поддержки и доотверждения ультрафиолетовым облучением их заливают с обратной стороны вспомогательным материалом – двухкомпонентной эпоксидной смолой с наполнителем из алюминиевого порошка.

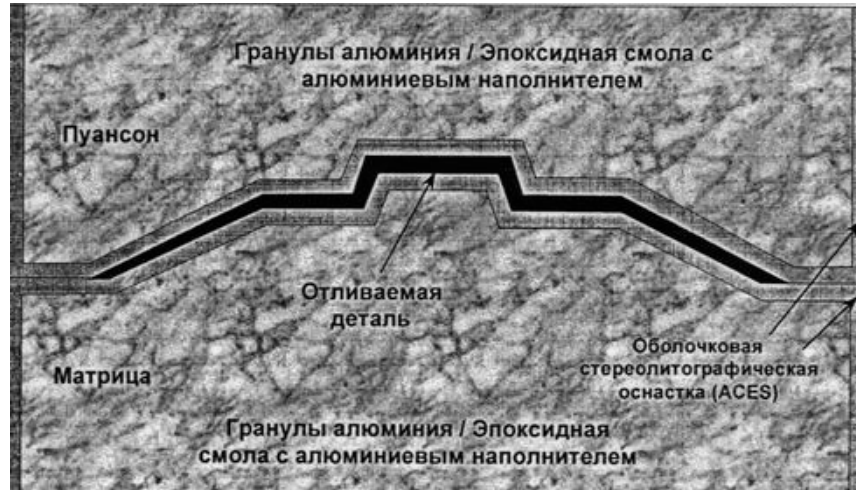


Рисунок 1.35 – Оболочковые стереолитографические формообразующие пуансон и матрица

Преимущества оболочковой стереолитографической оснастки:

- увеличена удельная теплопроводность;
- снижены затраты – стоимость эпоксидной смолы с алюминиевым наполнителем ниже, чем стоимость полимера.

Кроме этого, современные 3D принтеры от Z Corporation позволяют создавать литейные формы при помощи фирменной технологии ZCast (рисунок 1.36).

APPLICATIONS: METAL CASTING

## Break the mold.

Eliminate the limitations of traditional metal casting methods.

Left: ZCast mold and aluminum pipe created using the ZCast technology. Above: Screen shot of ZCast mold and core set created in 3D CAD.



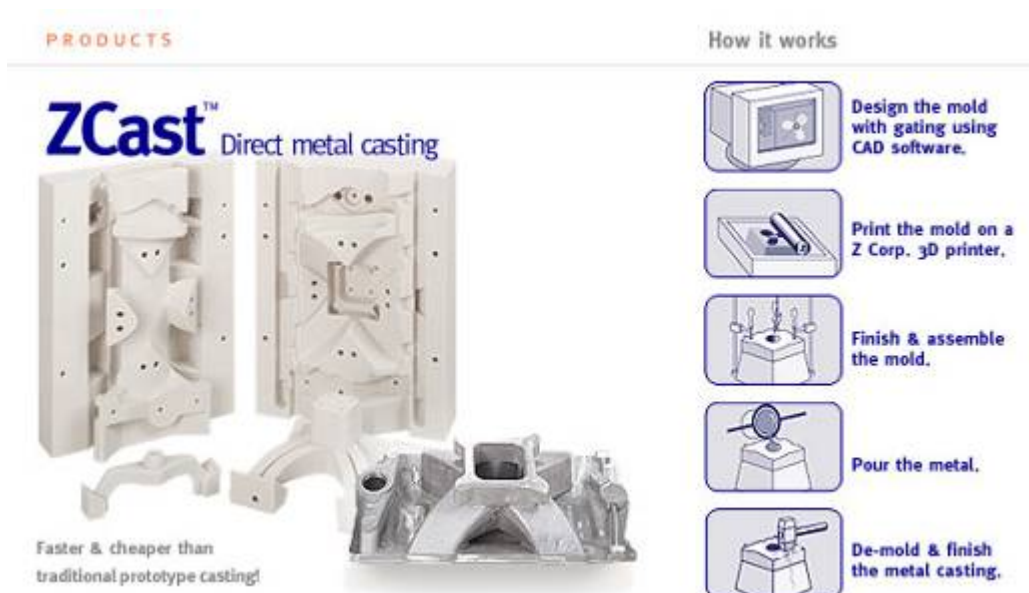


Рисунок 1.36 – Примеры изделий, литейные формы для которых были изготовлены на 3D принтере

#### 1.3.5.4 АТ с использованием листовых материалов

В крупносерийном и массовом производстве пластмассовых изделий, стойкость пресс-форм должна обеспечивать изготовление тысяч изделий, что предопределяет необходимость использования металлических пресс-форм из качественных сталей [3]. Проблема усложняется тем, что для получения высококачественных изделий необходимо обеспечить строгий и равномерный режим охлаждения пластмассы в пресс-форме. Практически это означает, что охлаждающие каналы должны максимально повторять формы изготавливаемых изделий, что невозможно сделать с помощью традиционных технологий.

Как известно, АТ за счет послойного наращивания изделия позволяют получать любую форму и размеры поверхностей, включая закрытые полости. Для вышеуказанной цели больше всего подходит идея АТ с использованием листовых материалов. Несмотря на то, что промышленные установки не предусматривают использование металлических листов или полос, сама идея реализована в промышленности в виде отдельных, непосредственно не связанных между собой блоков.

Суть этой технологии заключается в следующем: изделие, в данном случае пресс-форма, проектируется на компьютере, при этом форма и размеры охлаждающих каналов соответствуют строгим теоретическим расчетам, гарантирующим высокое качество изготавливаемого изделия. По результатам компьютерного проектирования, каждый слой изготавливается с помощью лазерной установки из листового материала требуемой марки. В частном случае, эта операция может выполняться с помощью традиционных технологий (например, фрезерованием). Изготовленные из листового металла слои пресс-формы, собираются вместе и сжимаются с помощью специальных устройств, например, скоб. Сжатый пакет листовых слоев сваривается с помощью диффузионной сварки, приобретая монолитный характер, т.е. соответствующий



по прочности цельному изделию. При использовании технологий, не требующих разогрева пластмасс до высоких температур вместо сварки можно использовать склеивание. В отдельных случаях вполне допустимым может оказаться простое механическое скрепление листов в единое целое с помощью, например, болтовых соединений. В случае необходимости, отдельные поверхности изделия можно подвергать традиционной механической дополнительной обработке. Этот процесс создания изделий от возникновения идеи до запуска в производство схематически изображен на рисунке 1.37.



Рисунок 1.37 – Схема процесса создания пресс-форм из металлов

Как известно, традиционные методы создания металлических пресс-форм, в зависимости от сложности конструкции, требуют больших и временных, и финансовых затрат, что отодвигает сроки выхода изделия на рынок от момента возникновения идеи в среднем на один год и более. Использование АТ не только существенно сокращает сроки проектирования изделия, но и обеспечивает их более высокое качество. Благодаря возможности изготовления охлаждающих каналов любой формы и траектории, процесс

изготовления изделий в таких пресс-формах можно полностью автоматизировать, но главное, это обеспечивает надежность получения высококачественных изделий.

Приведенные выше примеры показывают, как могут быть использованы аддитивные технологии уже сегодня.

## **2. Перспективы развития аддитивных технологий**

### **2.1 Усовершенствование освоенных АТ**

Анализ выше изложенного материала позволяет сделать вывод о насущной необходимости совершенствовать следующие свойства АТ:

- повышать производительность всех видов технологий;
- повышать геометрическую точность изготавливаемых изделий;
- расширять ассортимент используемых конструкционных материалов.

Несмотря на то, что современные АТ используются часто для изготовления различного вида моделей они практически полностью преобразили все стадии создания изделий и уже нашли применение в большинстве отраслей промышленности. Именно над решением указанных проблем работают сотрудники кафедры ТПС Университета ИТМО, готовя специалистов по проектированию и эксплуатации аддитивных установок. Но, несмотря на то, что АТ произвели подлинную техническую революцию, их будущие возможности вообще безграничны.

### **2.2 Перспективы АТ**

В этом учебном пособии будут изложены возможности АТ, которые в той или иной степени уже достигнуты и высказаны предположения, в реальность которых можно поверить уже сейчас [4].

Благодаря появлению инновационных материалов, 3D-принтеров и новых методов проектирования человечество сможет создавать объекты, способные по команде осуществлять самосборку, изменять свои форму и свойства.

Благодаря последним достижениям в области компьютерного моделирования и материаловедения, стало возможным создание программируемых материалов, из которых человек будет изготавливать объекты, способные к самоорганизации – такие, которые смогут сами себя собирать и выстраивать, изменяя при этом свои форму и свойства при внешнем воздействии. Ученые уже научились создавать самосборные механизмы, правда, пока совсем крошечные, наноразмерные, они используются в качестве биохимических датчиков, электронных устройств и средств доставки лекарственных веществ внутри организма человека. Однако, более интересно создавать программируемые материалы, по размеру более близкие к человеку. Как это сделать? Двумя способами. Первый заключается в том, чтобы изготавливать отдельные блоки – элементарные строительные кирпичики, которые могли бы, самостоятельно, объединяясь друг с другом или разъединяясь, формировать, тем самым, программируемые структуры более высокого уровня. Второй подход заключается в том, чтобы создавать монолитные объекты, которые при определенном внешнем воздействии изменяют свою форму и функции, благодаря тому, что в них запрограммированы определенные свойства, т.е. заранее определены линии перегиба, обозначены участки концентрации напряжения и вставлены электронные схемы. Этот второй подход мы и называем четырехмерной (или

4D) печатью. Сначала используется 3D-печать: принтер создает объект путем послойного распределения вещества; в результате на выходе мы получаем изделие нужной конфигурации. Однако впоследствии – и в этом особенность 4D-печати – напечатанные таким образом изделия могут через определенный промежуток времени менять свою форму и свойства.

Различные изделия, изготовленные из программируемых материалов, могут собирать и выстраивать себя сами, без человеческого участия. Это особенно важно в условиях опасных для жизни или даже для здоровья человека. Например, освоение космоса не реально без использования АТ. Доставлять все необходимое для жизни человека с Земли просто не реально, а доставить на другие планеты, в том числе на удаленные на большие расстояния, установку 4D-принтер возможно уже сегодня. На других планетах или на орбите можно будет превращать одни изделия в другие или менять их свойства по мере надобности. Если иметь в виду освоенные аддитивные технологии, в частности, 3D-принтеры, то в неживой природе можно найти аналог этим технологиям, например, рост сталактитов и сталагмитов. Что касается установок 4D-принтеров, то аналогов их продукции, причем в массовом количестве, мы встречаем только в так называемой живой природе, «продукты» которой на протяжении своей жизни намеренно или запрограммировано меняют и свою геометрию, и свои возможности, и назначения. Отдельные ученые говорили о программируемых материалах еще в конце XX-го века, но практически этим стали заниматься только в 2007 году после того, как знаменитое Управление перспективных исследований Министерства обороны США (DARPA) начало финансировать проект под названием «Программируемый материал» – (Prograttailer Malier). DARPA разработало долгосрочный план по созданию роботизированных микроскопических систем, которые способны превращаться в более крупные системы военного назначения, такие как физические дисплеи и специализированные антенны. За несколько лет ученые добились успехов в создании миниатюрных роботов, способных менять свою форму. Размеры этих искусственных созданий достигают всего нескольких миллиметров – не больше, но работы продолжаются. Сейчас ученые занимается проблемой создания с помощью 4D-печати таких устройств, на которые не нужно было бы устанавливать механизмы, привычные для роботов (моторчики, провода, электронную начинку). В лаборатории исследования самосборных систем (SAЦ при Массачусетском технологическом институте (MIT) ученые создали объект, напоминающий змею и изготовленный из специального полимера, который после погружения в воду сам собой раскладывается, образуя буквы «M I T». Ученые также создали такие любопытные изделия, как полимерная нить, которая переводит аббревиатуру MIT в SAL. Плоская пластинка, которая самостоятельно складывается, образуя октаэдр, плоский диск, который при контакте с водой преобразуется в изогнутую структуру, напоминающую фигурку оригами. Кристофер Уильямс (Christopher B. Williams) из политехнического университета Вирджинии напечатал на 3D-принтере гибкие

конструкции, в которые он внедрил проволоочки, изготовленные из специальных сплавов и электронные схемы. Вскоре после завершения печати эта конструкция под влиянием внешнего сигнала ожила и стала изменять свою форму. Данный подход открывает большие перспективы в робототехнике, при сборке мебели и в строительстве. Ученые пошли еще дальше: они объединили 4D-печать и наноматериалы. Если в процессе печати в объект внедрить наноматериалы, то на выходе получатся многофункциональные нанокompозиты, способные изменять свои свойства при воздействии на них электромагнитных волн (обычного света или ультрафиолетового излучения). Например, ученым удалось напечатать логотип Virginia Tech со встроенными в него наноматериалами, которые меняют цвет в зависимости от освещения. В ходе дальнейшей эволюции таких материалов появится новый класс датчиков, которые можно будет встраивать в медицинские приборы, контролирующие у пациентов артериальное давление, уровень инсулина и другие параметры.

Уже в настоящее время без проблем можно на 3D-принтере «вырастить» нужное изделие, но если мы хотим, чтобы оно могло менять свои формы, функции и назначения нужно «заложить» в управляющие программы аддитивных установок много дополнительных данных, в том числе о свойствах программируемых материалов и о трансформациях, которые должны произойти с выращенным изделием. С таким количеством данных, плюс множество вариантов и последовательностей возможных трансформаций просто не справляются современные САПР. Понятно, что для решения такой сложной задачи необходимо разработать адекватную модель всего процесса. С этой целью ученые создали целую библиотеку элементарных действий, используемых при сложной деформации любого нужного нам объекта, например, такие: сгибание, растягивание, скручивание, сжатие и т. д. Получается, что сложная деформация всего объекта целиком зависит от суммы составляющих ее элементарных деформаций. Объекты можно конструировать двумя способами: или с помощью последовательного набора команд (например, «согнуть», – «согнуть», – «растянуть»), или задать команды логически («если произойдет деформация А – выполнить В», «если произойдет В – выполнить С»). Количество аналогичных команд увеличивается, особенно количество их комбинаций, поэтому, если мы хотим внедрить в нашу повседневную жизнь программируемые материалы, мы должны вначале разработать компьютерный софт, способный моделировать трансформацию созданных объектов и переводить их на язык команд принтера. Для решения этих задач американцы уже запустили проект Cyborg и уже добились определенных успехов. Вначале программируемые материалы создали на основе одной команды и комбинации из двух материалов. Но уже разработаны программируемые материалы, позволяющие создавать достаточно сложные объекты. Но здесь мы пока ограничены недостаточной мощностью компьютеров и рядом других причин. Лучшее представление о программируемых материалах можно получить с помощью вокселя – это объемный (пространственный) аналог пикселя. В программируемом материале

воксели являются теми «кирпичиками», из которых создаются более сложные объекты. Воксель может быть элементарной объемной частицей из любого материала. Он может вести себя как проводник или изолятор, как датчик или аккумулятор, как антенна и даже как компьютер. С помощью вокселей можно превращать одни объекты в другие, наделяя их запрограммированными свойствами по командам извне.

Ученые считают, что если основа жизни – белок состоит из двух десятков аминокислот, то, создав несколько десятков базовых вокселей, можно обеспечить большое многообразие создаваемых изделий.

Военное ведомство США уже работает над созданием с помощью 3D-печати запчастей для различных видов военной техники, поскольку это сулит огромную экономию средств и времени. А если появятся программируемые материалы, то это преобразит всю жизнь человека. Если «перенестись» в будущее и представить, что человечество владеет программируемыми материалами, то, как минимум, все современные проблемы человечества перестанут существовать. Любая сегодняшняя фантастика может стать реальностью. Конечно, возникнут новые проблемы, две из которых видны уже сегодня. Первая проблема – это хакеры. Представьте себе, что хакеры взломали программу, по которой построен ваш дом, и они дали ему команду сложиться, как карточный домик. Как говорится, комментарии излишни. Вторая проблема – это защита прав интеллектуальной собственности. Вы, например, запатентовали конкретное изделие, а оно «превратилось» в другое.

Это вполне реальные проблемы и «выход» из них нужно найти раньше, чем будут созданы программируемые материалы и начнется массовый выпуск 4D-принтеров.

Говоря о перспективах АТ, мы вынуждены ссылаться на достижения американских и некоторых других, но не отечественных ученых, но и у нас перспективы достаточно неплохие. Если в первом десятилетии XXI века только отдельные «продвинутые» предприниматели приобрели аддитивные установки, то теперь мы начали готовить специалистов по проектированию, производству и эксплуатации аддитивных установок, а значит, подключаем к решению этих важных проблем молодых и амбициозных людей. К использованию АТ подключились многие российские фирмы, в том числе крупные, например, «Росатом», который располагает всем необходимым не только для использования АТ, но и их развития и совершенствования.

Как говорит генеральный директор АО «Наука и инновации», входящего в объединение «Росатом» [3], у них есть все необходимое для использования и совершенствования АТ [5]:

- они сами знают, чего хотят и сами являются и заказчиками, и исполнителями;
- «Росатом» располагает прекрасными конструкторскими кадрами и не видит никаких неразрешимых проектных проблем;
- они способны разрабатывать самое сложное программное обеспечение, а это одна из основных проблем совершенствования АТ;

– они располагают мощными материаловедческими центрами, способными создавать самые современные материалы, в том числе нанопорошки из самых разнообразных конструкционных материалов;

– у них самая современная лазерная техника, которая в аддитивных технологиях играет ведущую роль.

Мы уже серийно производим изделия, которые невозможно изготовить с помощью традиционных технологий и помимо необычных выгод, которые дают нам АТ, они уже сейчас позволяют экономить нам материалы, стоимость которых просто зашкаливает.

Одной из главных задач любых технологий является рост производительности труда с целью увеличения для человека свободного времени, которое он может использовать по своему усмотрению. АТ, как никакие другие в перспективе могут довести свободное время человека практически до 24 часов в сутки. И в этом еще одна очень серьезная проблема: одни люди будут самосовершенствоваться, а другие не будут знать, куда себя деть, с известными нам вытекающими последствиями. Проблем много, но альтернативы аддитивным технологиям пока не видно.



## Литература

1. Валетов В.А. Новые технологии в приборостроении: учеб. пособие/ В.А. Валетов, С.В. Бобцова. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. – 120 с.
2. Валетов В.А. Влияние RP-технологий на качество изделий: статья/ В.А. Валетов, С.В. Бобцова// Инструмент и технология, №№19-20. – 2004. – С. 20-24.
3. Валетов В.А. Изготовление пресс-форм с помощью RP-технологий: статья/ В.А. Валетов, С.В. Бобцова// Научно-технический вестник, выпуск 15, СПбГУИТМО, 2004. – С. 306-308.
4. Баннинг Гарретт, Томас Кемпбелл, Скайлар Тиббитс. Программируемый мир. В МИРЕ НАУКИ [01] январь 2015. – С.68-75.
5. А.В. Дуб. Технологии на вырост. ВМН, спецвыпуск – 2015. – С. 84-91.

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

## **КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

Кафедра технологии приборостроения относится к числу ведущих кафедр института со дня его основания в 1931 году. Тогда она называлась кафедрой механических технологий и возглавлялась известным ученым в области разработки инструмента профессором Александром Павловичем Знаменским. Позже она была переименована в кафедру технологии приборостроения.

За время своего существования кафедра выпустила из стен ВУЗа более двух тысяч квалифицированных инженеров, более сотни кандидатов и докторов наук. В разные годы ее возглавляли известные ученые и педагоги: профессора Николай Павлович Соболев, Андрей Александрович Маталин, Сергей Петрович Митрофанов.

Кафедра имеет выдающиеся научные достижения. Заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, профессором С.П. Митрофановым были разработаны научные основы группового производства, за что он был удостоен Ленинской премии СССР. Методы группового производства с успехом применяются в промышленности и развиваются его учениками. Заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, Заслуженным изобретателем СССР Юрием Григорьевичем Шнейдером разработаны метод и инструментарий нанесения регулярного микрорельефа на функциональной поверхности, которые развиваются и внедряются в производство его учениками.

В настоящее время, кафедра осуществляет выпуск бакалавров, магистров, специалистов и аспирантов по направлениям «Приборостроение», «Информатика и вычислительная техника».

Сейчас на кафедре реализуются пять магистерских программ: «Технологическая подготовка производства приборов и систем», «Аддитивные технологии», «Управление жизненным циклом приборов и систем», «Проектирование интегрированных автоматизированных систем технической подготовки производства приборов и систем», «Интегрированные системы в проектировании и производстве».

Валетов Вячеслав Алексеевич

**Аддитивные технологии  
(состояние и перспективы)**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Дизайн

Т.С. Осадчая

Верстка

Т.С. Осадчая

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**

**Университета ИТМО**

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49