

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Каблов В. Ф., Синьков А. В.

**Аддитивные технологии
в производстве полимерных изделий**

Электронное учебное пособие



2018

УДК 678.6
ББК 24.7
К 122

Рецензенты:

Профессор кафедры АТП, доктор физико-математических наук
филиала федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский
университет «МЭИ» в г. Волжском

В. Г. Кульков;

к.т.н., инженер-технолог ООО "Комед".

Провоторова Д. А.

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Каблов, В. Ф.

Аддитивные технологии в производстве полимерных изделий :
[Электронный ресурс] : учебное пособие / В. Ф. Каблов, А. В.
Синьков ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Электрон. текстовые дан. (1
файл: 2,47 МБ). – Волжский, 2018. – Режим доступа:
<http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-9948-2807-6

Содержит сведения по аддитивным технологиям при производстве
полимерных изделий. Рассмотрены методы трехмерной печати. Особое
внимание уделено технологии моделирования методом послойного
наплавления (FDM) и использованию FDM 3D принтеров на практике.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлениям
бакалавриата: 18.03.01 «Химическая технология» (профиль «Технология
переработки полимеров») и магистратуры 18.03.04 «Химическая технология»
(программа «Технология переработки эластомеров»), 15.03.05
«Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных
производств», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и
производств».

Ил. 42, библиограф.: 37 назв.

ISBN 978-5-9948-2807-6

© Волгоградский государственный
технический университет, 2018

© Волжский политехнический
институт, 2018

Содержание

Введение	5
1. Опыт ВПИ (филиала) ВолгГТУ по разработке 3D-принтеров и технологий 3D -печати	
2. История развития аддитивных технологий	10
3. Аддитивные технологии, их классификация и отличительные особенности	17
3.1. Технология струйной трехмерной печати (3DP)	19
3.2. Технология цветной струйной печати (CJP)	21
3.3. Технология цифровой светодиодной проекции (DLP).....	22
3.4. Технология прямого лазерного спекания металлов (DMLS)	23
3.5. Технология моделирования методом послойного наплавления (FDM). 26	
3.6. Технология изготовления объектов методом ламинирования (LOM) ...	29
3.7. Технология многоструйного моделирования MJM.....	30
3.8. Технология масочной стереолитографии (SGC)	31
3.9. Технология стереолитографии (SLA)	32
3.10. Технология выборочной лазерной плавки SLM	33
3.11. Технология выборочного лазерного спекание (SLS)	35
3.12. Технология производства электронно-лучевой плавкой (EBF□).....	36
4. Аппаратурная база аддитивных технологий, классификация, принцип действия, особенности эксплуатации.....	37
5. Особенности печати по FDM технологии (автор Бойцов Е. П.)	41
6. Материалы для FDM печати	45
6.1. ABS пластик.....	46
6.2. PLA пластик	48
6.3. Нейлон (Nylon) –полиамид.	52
6.4. Wood (Laywoo-D3)	55
6.5. Поликарбонат.....	57
6.6. Термоэластопластичные эластомеры.....	58
6.7. Поливиниловый спирт или PVA пластик	59
6.8. HIPS - ударопрочный полистирол.....	61
6.9. PET - полиэтилентерефталат.....	63
6.10. Laybrick - «каменная» нить	65
6.11. T-Glase - прочное стекло	65
6.12. Поливинилхлорид для 3D печати.....	66
6.13. Акрил	68
6.14.Поликапролактон (PCL)	69
6.15.Полипропилен (PP)	70
6.16.Полифенилсульфон (PPSU).....	72
6.17. Полиэтилен низкого давления (HDPE)	74
6.18. Некоторые другие материалы.....	78
6.19. Получение полимерных материалов с заданной структурой методами аддитивных технологий	85

7. Особенности подготовки модели к FDM печати (автор Бойцов Е. П.).....	87
8. Новые направления в 3D печати.....	90
8.1. 3D-БИОПЕЧАТЬ	90
8.2. Новые применения 3D печати	95
Глоссарий	98
Список использованной литературы.....	104

1. Введение

Широкое развитие методов компьютерного трехмерного моделирования, попросту CAD технологий, существенно повлияло на развитие новых средств для создания физических моделей на основе трехмерных цифровых. Все это можно именовать как технологии быстрого прототипирования или трехмерной печати. Они базируются на преобразовании электронных CAD-моделей в твердотельные физические формы с помощью специальных устройств- 3D принтеров.

Аддитивное производство, или 3D печать, началось с идеи быстрого прототипирования в 1980-е годы. Инженеры хотели найти быстрое решение для своих идей, быстро увидеть то, что придумали. С 1980-х годов эта технология улучшилась, появились новые техники, но самая первая была стереолитография. С того времени началась разработка новых технологий 3D-печати, появились новые решения и возможность использовать для печати новые материалы.

По мнению Генерального директора Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ), академика РАН Е. Н. Каблова доминантой национальной технологической инициативы должны стать аддитивные технологии, которые позволят промышленности перейти к производственным технологиям нового поколения. По его словам, для развития аддитивных технологий в нашей стране требуется тесная кооперация науки, промышленности и бизнеса. Необходимо объединить усилия проектных, творческих команд и динамично развивающихся компаний, которые готовы впитывать передовые разработки, подключить ведущие университеты, исследовательские центры, Российскую академию наук, крупные деловые объединения страны. ВИАМ является одним из ведущих центров развития аддитивных технологий в нашей стране и ведет большую координационную работу в этом направлении.

Говоря о мировом опыте, руководитель ВИАМ отметил рост рынка аддитивных технологий на 20%, при этом доля России составляет всего 1,7%. По его словам, главная задача – создать условия, чтобы промышленность более активно использовала возможности, которые предоставляют эти технологии.

Как отметил Е. Каблов, пока в нашей стране реально работают лишь два уровня реализации аддитивных технологий: вспомогательное производство и изготовление демонстраторов, прототипов деталей и элементов конструкций без обеспечения требований конструкторской документации. Третий уровень, представляющий изготовление опытных и серийных партий деталей, лишь начинает развиваться. В 2015 году специалисты ВИАМ впервые в России по аддитивной технологии с применением отечественной металлопорошковой композиции изготовили

завихритель фронтового устройства камеры сгорания перспективного авиационного двигателя ПД-14, отвечающий всем требованиям конструкторской документации.

В ВИАМ был организован замкнутый цикл аддитивного производства деталей сложных технических систем. Созданная инфраструктура позволяет в сжатые сроки разрабатывать технологии и изготавливать детали, отвечающие требованиям нормативной документации.

Существенным вопросом является разработка нормативной базы для аддитивных технологий. В этой связи он сообщил, что на базе ВИАМ в прошлом году был создан технический комитет по стандартизации "Аддитивные технологии".

[Евгений Каблов рассказал о развитии аддитивных технологий в России <https://www.aviaport.ru/digest/2016/06/02/388062.html>

Н. Ульянов Не попасть в технологическое рабство. Эксперт» 2017, №24, 12-18 июня, с.37-39.]

Теме аддитивные технологий посвящен специальный обзорный доклад ведущих экспертов (журнал «Эксперт» 2017, №24, 12-18 июня).

Важной задачей является и вопрос подготовки кадров. С этой целью был создан научно-производственного консорциума "Новые материалы и аддитивные технологии", в который вошли ВИАМ и ряд вузов. Для подготовки кадров кроме лабораторно-производственной базы необходимо и наличие учебно-методической литературы, которой сейчас явно недостает. В определенной степени издание настоящего пособия направлено на решение этой задачи.

В пособии рассмотрены следующие вопросы. Во втором разделе пособия приводятся исторические сведения развития аддитивных технологий и 3D печати. В третьем разделе представлена классификация аддитивных технологий и даны их отличительные особенности. В четвертом разделе приведена классификация, принцип действия и особенности эксплуатации аппаратной базы, используемой в аддитивных технологиях. В пятом разделе рассмотрены особенности печати по FDM технологии (автор Бойцов Е. П.). Шестой раздел посвящен материалам для FDM печати на 3D принтерах. В седьмом разделе рассмотрены особенности подготовки модели к FDM печати (автор Бойцов Е. П.).

1. Опыт ВПИ (филиала) ВолгГТУ по разработке 3D-принтеров и технологий 3D -печати

При написании пособия использован собственный опыт использования 3D печати, в том числе на принтерах, изготовленных в ВПИ (филиал) ВолгГТУ.

В 2014 г. студентом института Евгением Бойцовым был изготовлен первый 3D принтер (рис. 1.1), затем его конструкция была неоднократно усовершенствована. При активной поддержке директора института Виктора Каблова была создана лаборатория 3D-печати, а затем и городской центр 3D-технологий «3D Life». Инициаторами этого были также доцент Алексей Синьков и начальник НИС Сергей Благинин (рис. 1.1 и 1.2). При разработке второй модели 3D принтера (рис. 1.3), к проекту «3D Life» присоединился выпускник ВПИ инженер Роман Титов – разработчик топологии микроконтроллеров и программного обеспечения управления устройствами 3D печати.

Было начато выполнение первых заказов, в том числе достаточно сложных и уникальных изделий для Газпрома совместно с ВНТК (филиал) ВолгГТУ (рис. 1.4), для Волжского абразивного завода (рис. 1.5), для авиационной техники (рис. 1.6). В настоящее время центр «3D Life» развивается и охватывает несколько основных направлений в области аддитивных технологий:

- разработка и производство 3D принтеров новых конструкций;
- прототипирование и изготовление различных деталей методом FDM;
- обучение основам 3D моделирования и 3D печати на учебных базах кафедры механики ВПИ (филиал) ВолгГТУ и МДК «Искатель» МУ «КМЦ «Юность Волжского»;
- разработка полимерных материалов с различными физико-механическими свойствами для 3D-печати на кафедре ВТПЭ ВПИ (филиал) ВолгГТУ;
- разработка программного обеспечения для 3D печати.



Рис. 1.1. Первый 3D принтер «3D Life», сконструированный в ВПИ. Слева направо: Благинин С. И., Бойцов Е. П., Синьков А. В.



Рис. 1.2. Лаборатория 3D-печати ВПИ. Слева направо: Бойцов Е. П., Синьков А. В., Каблов В. Ф.



Рис. 1.3. Второй 3D принтер «3D Life», сконструированный в ВПИ. Титов Р. Н.

Центр «3D Life» сотрудничает со специалистами кафедры аддитивных технологий Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ). Налажены связи с томскими производителями филамента для 3D-печати. Ведутся работы по конструированию, дизайну и изготовлению различной продукции с промышленными предприятиями и организациями Волгоградской области.



Рис. 1.4. Секторы для газовой трубы диаметром 570 мм.



Рис. 1.5. Прессформа для изготовления деталей абразивного производства



Рис. 1.6. Вращающийся распылитель жидкости для распыления химикатов с легкомоторного самолета

2. История развития аддитивных технологий

Технология «трехмерной печати» появилась в конце 80-х гг. XX в. [15]. Пионером в этой области являлась компания 3D Systems, которая разработала первую коммерческую стереолитографическую машину – SLA – Stereolithography Apparatus (1986 г). До середины 90-х гг. она использовалась главным образом в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, связанной с оборонной промышленностью. Первые лазерные машины – сначала стереолитографические (SLA-

машины), затем порошковые (SLS-машины), были чрезмерно дороги, выбор модельных материалов – весьма скромный. Широкое распространение цифровых технологий в области проектирования (CAD), моделирования и расчетов (CAE) и механообработки (CAM) стимулировало взрывной характер развития технологий 3D-печати, и в настоящее время крайне сложно указать область материального производства, где в той или иной степени не использовались бы 3D-принтеры.

Цифровые 3D-технологии открыли уникальные возможности воспроизведения сложнейших пространственных форм, объектов и инженерных конструкций, механизмов. Сначала эти технологии назывались «технологиями быстрого прототипирования» (от английского RapidPrototyping), однако термин RP-технологии довольно быстро устарел и в настоящее время не отражает в полной мере реальной сути технологии. Методами «быстрого прототипирования» сейчас изготавливаются коммерческие изделия, которые уже нельзя назвать прототипами – имплантаты и эндопротезы, инструменты и литейные формы, детали самолетов и спутников и многое другое.

Аддитивные технологии (от английского AdditiveFabrication) или 3Dпечать – обобщенное название технологий, предполагающих изготовление изделия по данным цифровой модели (или CAD-модели) методом послойного добавления (add, англ. - добавлять, отсюда и название) материала. Получение изделия происходит послойно, путем формирования слоя материала, отверждения или фиксации этого слоя в соответствии с конфигурацией сечения CAD-модели. 3D печать является полной противоположностью таких традиционных методов механического производства и обработки, как фрезеровка или резка, где формирование облика изделия происходит за счет удаления лишнего материала.

Модельные (строительные) материалы могут быть жидкими (фотополимерные смолы, воски и др.), сыпучими (пески, порошковые полимеры, металлопорошковые композиции), в виде тонких листов (полимерные пленки, листы бумаги и др.), а также в виде полимерной нити или металлической проволоки, расплавляемой непосредственно перед формированием слоя построения.

При использовании AF-технологий все стадии реализации проекта от идеи до материализации находятся в единой технологической среде, где каждая технологическая операция выполняется в цифровой CAD/CAM/CAE- системе. Практически это означает реальный переход к «бесбумажным» технологиям.

Аддитивные технологии охватывают все новые сферы деятельности человека. Дизайнеры, архитекторы, археологи, палеонтологи и представители других профессий используют 3D-принтеры для реализации

различных идей и проектов. Активно создаются роботизированные комплексы для «печати» быстротвердеющими бетонными смесями.

Аддитивные технологии – наиболее динамично развивающаяся отрасль. По мнению TroyJensen, аналитика инвестиционного банка PiperJaffray, к 2020 г. ожидается увеличение рынка продаж 3D-принтеров и услуг до 5,0 млрд. долларов.

По данным WohlersAssociates, 38% мировой индустрии аддитивных технологий приходится на США, на втором месте Япония с 9,7%, за ней следует Германия с 9,4% и Китай с 8,7%.

Российский рынок составляет менее 0,5 % мирового, и в течение следующих пяти лет его темпы роста не увеличатся, отмечают в Research.Techart. Неудивительно, ведь развитие аддитивных технологий в России находится в зачаточном состоянии, основной причиной ситуации, по мнению экспертов, является отсутствие поддержки со стороны государства.

Чтобы развивать технологию, необходима работа сразу в нескольких направлениях: и подготовка квалифицированного персонала, и формирование новых стандартов, и принятие новых нормативных документов. Не менее важной проблемой является отсутствие в России серийного производства порошков. Тем не менее, какие-то точечные действия в этом направлении предпринимаются как отдельными чиновниками, так и учеными.

Западные аналитики рассматривают степень внедрения АФ-технологий в материальное производство как надежный индикатор реальной индустриальной мощи государства.

Предшественниками современных АФ-технологий считают две оригинальные технологии, появившиеся в XIX в. В 1890 г. Josef E. Blanner предложил способ изготовления топографических макетов 3-х мерных карт поверхности местности. Суть метода заключалась в следующем: из тонких восковых пластин по контурным линиям топографической карты вырезались фрагменты, соответствующие воображаемому горизонтальному сечению объекта, затем эти пластины укладывались друг на друга в определенном порядке и склеивались. Получался «послойный синтез» холма или оврага. После этого поверх полученных фигур накладывали бумагу и формировали макет отдельного элемента ландшафта, который затем уже в «бумажном» виде располагали в соответствии с исходной картой (рисунок 2.1).

J. E. BLANTHER.
MANUFACTURE OF CONTOUR RELIEF MAPS.

No. 473.901.

Patented May 3, 1892.

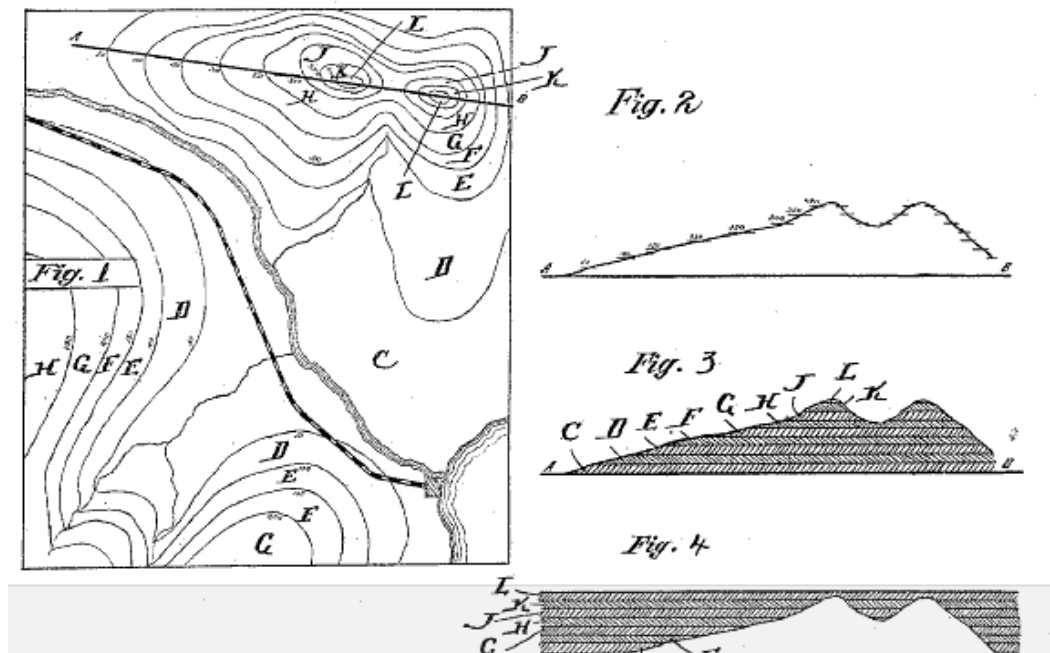


Рис. 2.1. Блантер Дж. Патент США 473901, выдан 03.05.1892 г.

Практическое применение эта идея нашла в LOM-технологии - LaminationObjectManufacturing - послойном ламинировании или склеивании тонких листовых материалов, толщина листов при этом составляет 0,051-0,25 мм. В 1979 г. профессор Nakagawa из Токийского университета предложил использовать эту технологию для быстрого изготовления пресс-форм, в частности, со сложной геометрией охлаждающих каналов.

Вторая технология – фотоскульптура (Photosculpture) была предложена французом François Willème в 1890 г. (рисунок 2.2). Суть ее состояла в следующем: вокруг объекта или субъекта располагали фотокамеры (Willème использовал 24 камеры с шагом 15 градусов) и производили одномоментное фотографирование на все камеры. Затем каждое изображение проецировали на полупрозрачный экран, и оператор с помощью пантографа обрисовывал контур. Пантограф был связан с режущим инструментом, который удалял модельный материал – глину – в соответствии с профилем текущего контура. Для уменьшения трудоемкости процесса Willème немец Carlo Baesev 1904 г. предложил использовать фоточувствительный желатин, который при обработке водой расширяется в зависимости от степени засветки – экспозиции (Пат. США 774549, Photographicprocessforthereproductionofplasticobjects, 08.11.1904).



Рис. 2.2. Фотоскульптура по технологии François Willème

В 1935 г. Isao Morioka предложил способ, сочетающий в себе топографию и фотоскульптуру (рисунок 2.3). Этот способ предполагал использование структурированного света (сочетание черных и белых полос) для создания топографической «карты» объекта – набора контуров.

Контурные затем вырезались из листового материала, укладывались в определенном порядке и таким образом формировался трехмерный образ объекта. Или же, как и у François Willème, контуры могли быть спроецированы на экран для дальнейшего создания трехмерного образа с помощью режущего инструмента.

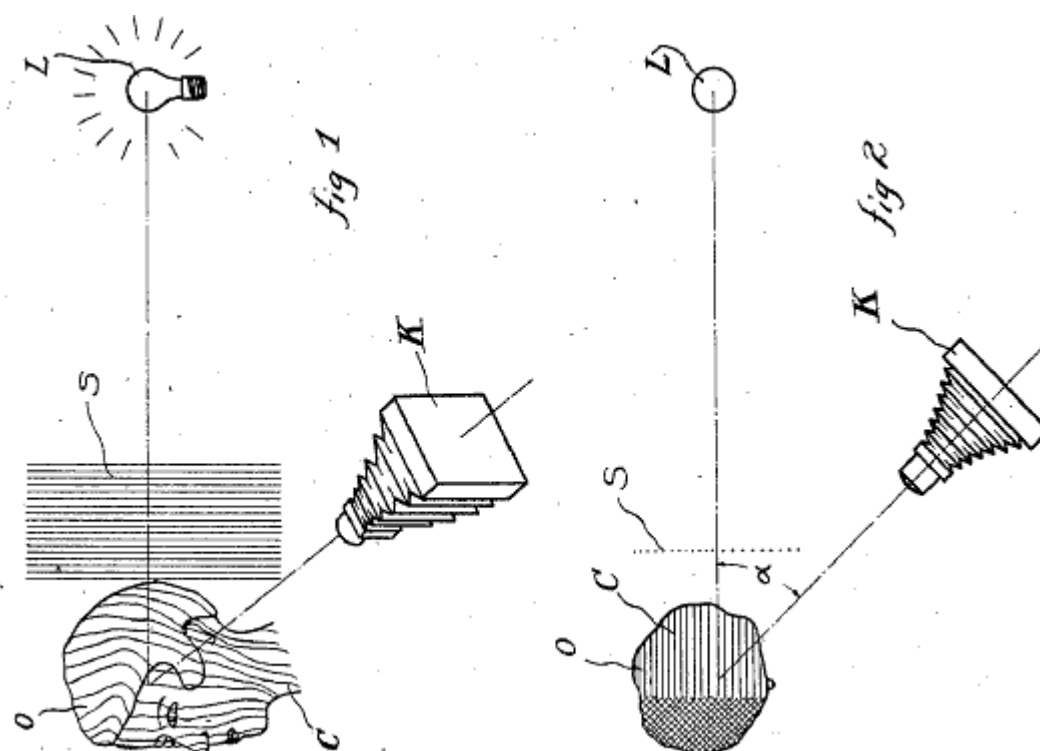


Рис. 2.3. Процесс изготовления рельефного изображения при помощи фотографии. Пат. США 2015457

Первым приближением к стереолитографии в современном понимании стала идея OttoMunz(1956 г.), который предложил способ селективной (послойной) экспозиции прозрачной фотоэмульсии. На этот слой проецировался контур (сечение) объекта. В качестве платформы, на которой производилась экспозиция, использовался поршень, установленный в цилиндре с возможностью перемещения. Поршень перемещали на определенную величину (т.е. с определенным шагом) и сверху наносили слой эмульсии, проецируя на него изображение, после чего наносили слой фиксирующего реагента. И так каждый шаг: поршень перемещали вниз, наносили фотоэмульсию, засвечивали, наносили слой фиксирующего реагента и т.д.

Фиксирующий состав наносился на весь слой: и на засвеченные участки, и на не засвеченные, в результате внутри затвердевшего прозрачного материала, сформированного в виде цилиндра, оказывался заключенным образ трехмерного объекта (рисунок 2.4). На патент (Пат.США № 2775758) OttoMunz, как на предшественника современной стереолитографии, ссылаются практически все авторы новых изобретений в области аддитивных технологий.

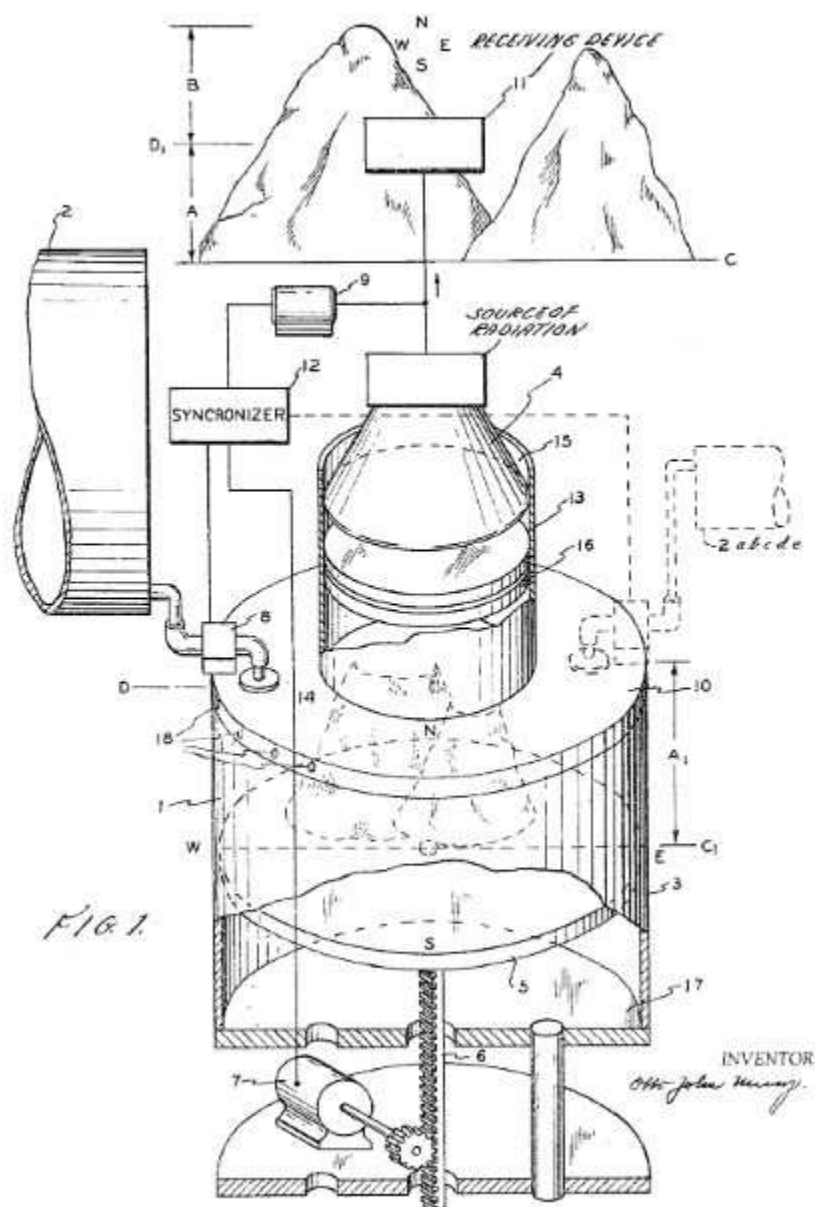


Рис. 2.4. Фото-символ записи. Пат. США № 2775758, выдан 25.12.1956 г.

В 1977 г. Wyn Kelly Swainson (Пат. США № 4041476) предложил способ получения трехмерных объектов посредством отверждения фоточувствительного полимера в точке пересечения двух лазерных лучей. Примерно в это же время начинают появляться технологии послойного синтеза из порошковых материалов (Р.А. Ciraud, 1972).

В 1981 г. R.F. Housholder (Пат. США № 4247508) предложил способ формирования тонкого слоя порошкового материала путем нанесения его на плоскую платформу. Далее производилось разравнивание до определенной величины с последующим спеканием слоя. В том же году Hideo Kodama опубликовал результаты работы с первых функциональных систем фотополимеризации с помощью ультрафиолетовой (УФ) лампы и лазера. В 1982 г. была опубликована

работа А. J. Herbert по созданию трехмерных моделей с помощью X- Y-плоттера, УФ-лампы и системы зеркал.

Процесс патентования новых технических решений по AF-технологиям приобрел лавинообразный характер. В 1986 г. Charles W. Hull предложил способ послойного синтеза посредством ультрафиолетового излучения, сфокусированного на тонкий слой фотополимерной смолы. Он же и ввел в оборот термин «стереолитография».

Charles W. Hull стал основателем фирмы 3D Systems – компании, первой приступившей к коммерческой деятельности в области послойного синтеза. С этого момента началась новая эпоха в индустрии – эпоха AF-технологий.

3. Аддитивные технологии, их классификация и отличительные особенности

Существуют разные процессы изготовления по средствам аддитивных технологий, но всех их объединяет то, что прототип изготавливается путем послойного наложения композитного материала. Основное преимущество аддитивных технологий состоит в том, что прототип создается за один прием, а исходными данными для него служит непосредственно геометрическая модель детали. Таким образом, отпадает необходимость в планировании последовательности технологических процессов, специальном оборудовании для обработки материалов, транспортировке от станка к станку и т. д. Однако по сравнению с обработкой на станке с ЧПУ этот процесс имеет существенный недостаток – ограниченность выбора материалов. Физические объекты, изготовленные методом 3D печати, используются главным образом в качестве прототипов или шаблонов для других производственных процессов.

В основе своей процессы 3D печати состоят из трех шагов: формирование поперечных сечений изготавливаемого объекта, послойное наложение этих сечений и комбинирование слоев. Таким образом, чтобы создать физический объект, этим процессам требуются данные лишь о поперечных сечениях; кроме того, исчезают следующие проблемы, часто возникающие в связи с другими производственными процессами.

В международном сообществе, так же, как и в России, устоявшейся классификации аддитивных технологий пока не принято. Различные авторы подразделяют их:

- по применяемым строительным (модельным) материалам (жидкие, сыпучие, полимерные, металлопорошковые и т.д.);
- по наличию или отсутствию лазера;
- по методам подвода энергии для фиксации слоя построения (с помощью теплового воздействия, облучения ультрафиолетовым или видимым светом, посредством связующего состава и т.д.);

- по методам формирования слоя.

Также существует классификация по технологии 3D-печати. Их можно разделить технологии по основным направлениям.

Экструзионная печать. Сюда входят такие методы, как послойное наплавление (fdm) и многоструйная печать (mjm). В основе этого метода лежит выдавливание (экструзия) расходного материала с последовательным формированием готового изделия. Как правило, расходные материалы состоят из термопластиков, либо композитных материалов на их основе.

Плавка, спекание или склеивание. Этот подход основывается на соединении порошкового материала в единое целое. Формирование производится разными способами. Наиболее простым является склеивание, как в случае со струйной трехмерной печатью (3dp). Подобные принтеры наносят на рабочую платформу тонкие слои порошка, которые затем выборочно склеиваются связующим материалом. Порошки могут состоять из практически любого материала, который можно измельчить до состояния пудры.

Наиболее популярными же в данной категории стали технологии лазерного спекания (sls и dmls) и плавки (slm), позволяющие создавать цельнометаллические детали. Как и в случае со струйной трехмерной печатью, эти устройства наносят тонкие слои порошка, но материал не склеивается, а спекается или плавится с помощью лазера. Лазерное спекание (sls) применяется для работы как с пластиковыми, так и с металлическими порошками, хотя металлические гранулы обычно имеют более легкоплавкую оболочку, а после печати дополнительно спекаются в специальных печах. Dmls – вариант sls установок с более мощными лазерами, позволяющими спекать непосредственно металлические порошки без добавок. Slm-принтеры предусматривают уже не просто спекание частиц, а их полную плавку, что позволяет создавать монолитные модели, не страдающие от относительной хрупкости, вызываемой пористостью структуры. Как правило, принтеры для работы с металлическими порошками оснащаются вакуумными рабочими камерами, либо замещают воздух инертными газами. Подобное усложнение конструкции вызывается необходимостью работы с металлами и сплавами, подверженными оксидации – например, с титаном.

Стереолитография. Стереолитографические принтеры используют специальные жидкие материалы, называемые «фотополимерными смолами». Термин «фотополимеризация» указывает на способность материала затвердевать под воздействием света. Как правило, такие материалы реагируют на облучение ультрафиолетом. Смола заливается в специальный контейнер с подвижной платформой, которая устанавливается в позиции возле поверхности жидкости. Слой смолы, покрывающий платформу, соответствует одному слою цифровой модели.

Затем тонкий слой смолы обрабатывается лазерным лучом, затвердевая в точках соприкосновения. По окончании засветки платформа вместе с готовым слоем погружается на толщину следующего слоя, и засветка производится вновь.

Ламинирование. Слои материала наклеиваются друг на друга и обрезаются по контурам цифровой модели с помощью лазера или лезвия.

Такие установки хорошо подходят для макетирования и могут использовать очень дешевые расходные материалы, включая обычную офисную бумагу. Тем не менее, сложность и шумность таких принтеров, вкупе с ограниченными возможностями изготавливаемых моделей ограничивают их популярность.

Наиболее популярными методами 3d-печати, применяемыми в быту и в офисных условиях, стали моделирование методом послойного наплавления (fdm) и лазерная стереолитография (sla).

Рассмотрим более подробно наиболее распространенные технологии более подробно по основным критериям: определение, принцип действия, используемые материалы, преимущества и применение данных технологий.

3.1. Технология струйной трехмерной печати (3DP)

Струйная трехмерная печать (3DP) – один из старейших методов аддитивного производства. Эта технология была разработана в Массачусетском технологическом институте (MIT) в 1993 году. Технология получила коммерческое распространение в 1995 году с помощью компании ZCorporation, приобретенной корпорацией 3D Systems в 2012 году.

Как и другие технологии аддитивного производства, струйная трехмерная печать подразумевает послойное построение физических объектов на основе цифровой трехмерной модели. В качестве расходных материалов используются всевозможные порошки, наносимые последовательными тонкими слоями. Контурные модели вычерчиваются печатной головкой, наносящей связующий материал (рис. 3.1). Таким образом, частицы каждого нового слоя склеиваются между собой и с предыдущими слоями до образования готовой трехмерной модели.

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

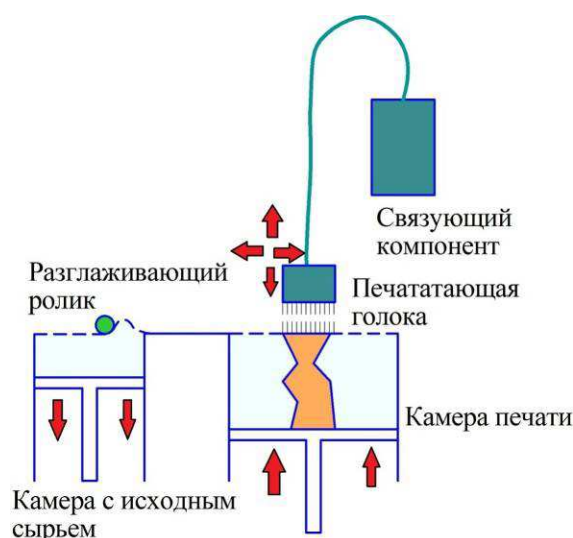


Рис. 3.1. Склеивание или спекание порошкообразного материала (ThreeDimensionalPrinting, 3DP)

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

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

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

Наряду с высокой универсальностью в плане используемых материалов, метод 3DP отличается отсутствием необходимости печати опорных структур. Такие популярные методы, как FDM или LA требуют постройки дополнительных элементов, называемых «опорами» или

«поддержками» для стабилизации навесных элементов печатаемых моделей. В противном случае существует реальная возможность провисания слоев и деформации моделей, а в крайних случаях печать вообще невозможна ввиду отсутствия необходимой опорной поверхности. В случае с 3DP необходимость создания опорных структур отпадает, так как каждый слой порошка служит естественной опорой для следующего слоя. Стоит отметить и экономичность технологии: остаточный порошок может быть собран из рабочей камеры по завершении печати и использован в следующем производственном цикле.

Технология 3DP пользуется широкой популярностью и применяется в самых различных отраслях, зачастую теряя свое оригинальное обозначение. Так, в сфере биопечати используется вариант технологии, известный как «капельная/струйная печать» или DOD (Drop on Demand). Этот метод применяется для послойного нанесения живых клеток с целью построения органических тканей.

Одним из наиболее ярких методов применения 3DP стало создание кондитерских принтеров ChefJet, строящих трехмерные съедобные модели из сахаросодержащих продуктов, склеивая частицы материала водой, наподобие оригинальных «гипсовых» принтеров.

3.2. Технология цветной струйной печати (CJP)

Цветная струйная печать (CJP) – разновидность струйной трехмерной печати (3DP), фирменная технология компании 3D Systems.

Как и в случае с трехмерной струйной печатью (3DP), технология CJP подразумевает нанесение тонких слоев порошкообразных расходных материалов, с последующим выборочным нанесением связующего полимера. Отличительной особенностью технологии является использование разноцветных связующих элементов, что позволяет создавать комплексные цветные 3D-модели.

Неизрасходованные материалы не удаляются из рабочей камеры во время процесса, а служат в качестве опоры для последующих слоев, что позволяет создавать объекты высокой геометрической сложности. Тем не менее, по завершении цикла печати остаточный порошок может быть собран и использован заново.

В качестве расходных материалов используются пластики с разнообразными механическими свойствами, имитирующими резину, ударопрочные термопластики и другие материалы.

Например, CJP принтеры компании 3D Systems используют материалы VisiJetPXL с пропиткой материалом ColorBond (для упрочнения цветных моделей), StrengthMax (высокопрочная пропитка для функциональных моделей) или SaltWaterCure (экологичная пропитка, позволяющая повышать прочность поверхностных слоев).

Технология цветной струйной печати (CJP) применяется в основном для прототипирования изделий сложной геометрической формы и цветовой гаммы, а также для производства мелкосерийных партий готовых изделий.

Метод применяется в медицине, промышленном дизайне, образовании, архитектурном дизайне и даже в кукольной мультипликации.

Ввиду относительно высокой стоимости CJP принтеров, данная технология пока не получила широкого бытового распространения и используется в основном в профессиональной среде. В то же время, технология CJP гораздо более доступна, чем использование таких высокоточных методов быстрого прототипирования, как выборочное лазерное спекание (SLS), и более универсальна в отношении создания цветных моделей, чем лазерная стереолитография (SLA).

3.3. Технология цифровой светодиодной проекции (DLP)

Цифровая светодиодная проекция (DLP) – метод аддитивного производства, вариант стереолитографической 3D-печати.

Одним из наиболее популярных методов аддитивного производства высокоточных прототипов является лазерная стереолитография (SLA). Метод основан на использовании фотополимерных смол, затвердевающих при облучении ультрафиолетовым светом. В то время как технология SLA находит широкое применение в профессиональной среде, ее распространение ограничивается достаточно высокой стоимостью устройств, обусловленной применением дорогостоящих лазерных излучателей.

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

DLP-печать появилась совсем недавно, но уже демонстрирует прекрасные результаты, сопоставимые по точности и производительности с оригинальной технологией лазерной стереолитографии (SLA), запатентованной Чарльзом Халлом в 1986 году и давшей первый существенный толчок развитию 3D-печати. Основным преимуществом DLP над SLA может стать более низкая стоимость используемых проекторов по сравнению с лазерными излучателями.

С момента появления, DLP-принтеры составляют прямую конкуренцию устройствам, работающим по технологии SLA. DLP-

принтеры применяются в стоматологии, ювелирной промышленности, свободном дизайне и в производстве сувениров.

Как и стандартные стереолитографические устройства, DLP-принтеры имеют высокие показатели точности печати – минимальная толщина слоя может достигать 15 микрон с использованием существующих установок. Минимальная толщина слоя, наносимого более доступными FDM-принтерами, как правило, составляет не менее 50 микрон. Практически же, разрешение находится в обратной зависимости от скорости наслоения – технология позволяет достигать и более высоких показателей точности ценой снижения скорости печати. Расходные материалы, а именно фотополимерные смолы, имеют высокий диапазон механических характеристик: возможны имитаторы в диапазоне от твердых пластиков до резины. Как правило, печать осуществляется материалом одного цвета, но ограничений палитры не существует. Основным недостатком метода DLP, как и SLA, является относительно высокая стоимость расходных материалов - порядка \$80-160 за один литр жидкого полимера.

3.4. Технология прямого лазерного спекания металлов (DMLS)

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

Процесс включает использование трехмерных моделей в формате STL в качестве чертежей для построения физических моделей. Трехмерная модель подлежит цифровой обработке для виртуального разделения на тонкие слои с толщиной, соответствующей толщине слоев, наносимых печатным устройством (рис. 3.4). Готовый «построечный» файл используется как набор чертежей во время печати. В качестве нагревательного элемента для спекания металлического порошка используются оптоволоконные лазеры относительно высокой мощности - порядка 200Вт. Некоторые устройства используют более мощные лазеры с повышенной скоростью сканирования (т.е. передвижения лазерного луча) для более высокой производительности. Как вариант, возможно повышение производительности за счет использования нескольких лазеров.

DMLS позволяет создавать цельные металлические детали сложной геометрической формы

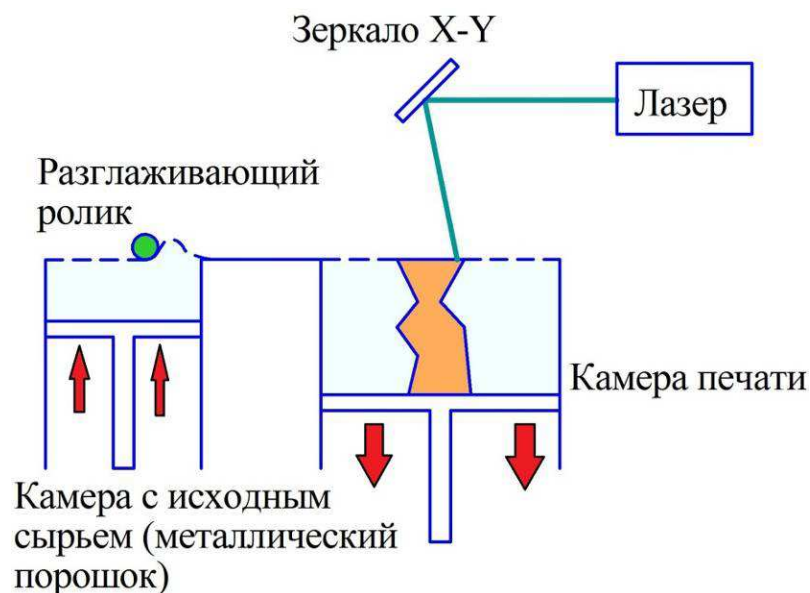


Рис. 3.4. Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)

Порошковый материал подается в рабочую камеру в количествах, необходимых для нанесения одного слоя. Специальный валик выравнивает поданный материал в ровный слой и удаляет излишний материал из камеры, после чего лазерная головка спекает частицы свежего порошка между собой и с предыдущим слоем согласно контурам, определенным цифровой моделью. После завершения вычерчивания слоя, процесс повторяется: валик подает свежий материал и лазер начинает спекать следующий слой. Привлекательной особенностью этой технологии является очень высокое разрешение печати – в среднем около 20 микрон. Для сравнения, типичная толщина слоя в любительских и бытовых принтерах, использующих технологию FDM/FFF, составляет порядка 100 микрон.

Другой интересной особенностью процесса является отсутствие необходимости построения опор для нависающих элементов конструкции. Порошок, который не спекся, не удаляется во время печати, а остается в рабочей камере. Таким образом, каждый последующий слой имеет опорную поверхность. Кроме того, неизрасходованный материал может быть собран из рабочей камеры по завершении печати и использован заново. DMLS производство можно считать фактически безотходным, что немаловажно при использовании дорогих материалов - например, драгоценных металлов.

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

Технология DMLS обладает несколькими достоинствами по сравнению с традиционными производственными методами. Наиболее

очевидным является возможность быстрого производства геометрически сложных деталей без необходимости механической обработки (т.н. «субтрактивных» методов – фрезеровки, сверления и пр.). Производство практически безотходно, что выгодно отличает DMLS от субтрактивных технологий. Технология позволяет создавать несколько моделей одновременно с ограничением лишь по размеру рабочей камеры. Построение моделей занимает порядка несколько часов, что несоизмеримо более выгодно, чем литейный процесс, который может занимать до нескольких месяцев с учетом полного производственного цикла. С другой стороны, детали, произведенные лазерным спеканием, не обладают монолитностью, а потому не достигают тех же показателей прочности, что и отлитые образцы, или детали, произведенные субтрактивными методами.

На данный момент установки DMLS применяются только в профессиональной среде из-за высокой стоимости.

DMLS активно используется в промышленности ввиду возможности построения внутренних структур цельных деталей, недоступных по сложности традиционным методам производства. Детали с комплексной геометрией могут быть выполнены целиком, а не из составных частей, что благоприятно влияет на качество и стоимость изделий. Так как DMLS не требует специальных инструментов (например, литейных форм) и не производит большого количества отходов (как в случае с субтрактивными методами), производство мелкосерийных партий с помощью этой технологии намного выгодней, чем за счет традиционных методов.

Технология DMLS применяется для производства готовых изделий малого и среднего размера в различных отраслях, включая аэрокосмическую, стоматологическую, медицинскую и др. Типичный размер области построения существующих установок составляет 250x250x250мм, хотя технологических ограничений на размер не существует – это лишь вопрос стоимости устройства. DMLS используется для быстрого прототипирования, снижая время разработки новых продуктов, а также в производстве, позволяя сокращать себестоимость мелких партий и упрощать сборку изделий сложной геометрической формы.

Северо-западный политехнический университет Китая использует DMLS системы для производства элементов конструкции самолетов. Исследования, проведенные EADS, также указывают на снижение себестоимости и отходов при использовании технологии DMLS для производства сложных конструкций в единичных экземплярах или мелкими партиями.

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

3.5. Технология моделирования методом послойного наплавления (FDM)

Моделирование методом послойного наплавления (англ. Fused Deposition Modeling (FDM)) – технология аддитивного производства, широко используемая при создании трехмерных моделей, при прототипировании и в промышленном производстве.

Технология FDM подразумевает создание трехмерных объектов за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели (рис. 3.5.1). Как правило, в качестве материалов для печати выступают термопластики, поставляемые в виде катушек нитей или прутков.



Рис. 3.5.1. Принцип FDM печати

Технология FDM была разработана С. Скоттом Трампом в конце 1980-х и вышла на коммерческий рынок в 1990 году.

Оригинальный термин «Fused Deposition Modeling» и аббревиатура FDM являются торговыми марками компании Stratasys. Энтузиасты 3D-печати, участники проекта RepRap, придумали аналогичный термин «Fused Filament Fabrication» («Производство методом наплавления нитей») или FFF для использования в обход юридических ограничений. Термины FDM и FFF эквивалентны по смыслу и назначению.

Производственный цикл начинается с обработки трехмерной цифровой модели. Модель в формате STL делится на слои и ориентируется наиболее подходящим образом для печати. При необходимости генерируются поддерживающие структуры, необходимые для печати нависающих элементов. Некоторые устройства позволяют использовать разные материалы во время одного производственного цикла. Например,

возможна печать модели из одного материала с печатью опор из другого, легкорастворимого материала, что позволяет с легкостью удалять поддерживающие структуры после завершения процесса печати. Альтернативно, возможна печать разными цветами одного и того же вида пластика при создании единой модели (рис. 3.5.2).



а



б

Рис. 3.5.2. Примеры моделей, полученных методом FDM: а – резьбовая крышка из АБС пластика; б – трехцветная ваза из PLA пластика

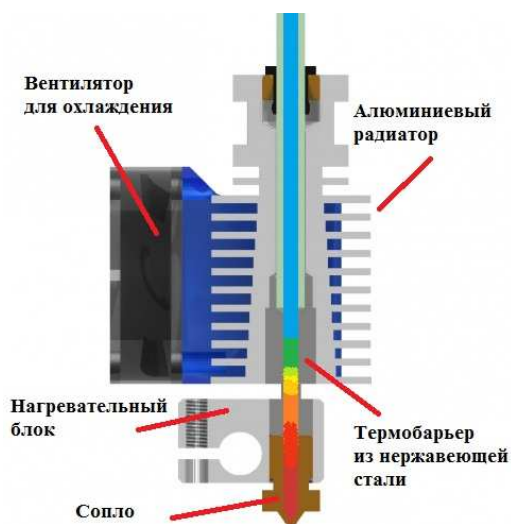


Рисунок 3.5.3. Экструзионная головка принтера FDM

Изделие, или «модель», производится выдавливанием («экструзией») и нанесением микрокапель расплавленного термопластика с

формированием последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования.

Пластиковая нить разматывается с катушки и подается в экструдер – устройство, оснащенное механическим приводом для подачи нити, нагревательным элементом для плавки материала и соплом, через которое осуществляется непосредственно экструзия (рис. 3.5.3). Нагревательный элемент служит для нагревания сопла, которое в свою очередь плавит пластиковую нить и подает расплавленный материал на строящуюся модель. Как правило, верхняя часть сопла наоборот охлаждается с помощью вентилятора для создания резкого градиента температур, необходимого для обеспечения плавной подачи материала.

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

Технология FDM отличается высокой гибкостью, но имеет определенные ограничения. Хотя создание нависающих структур возможно при небольших углах наклона, в случае с большими углами необходимо использование искусственных опор, как правило, создающихся в процессе печати и отделяемых от модели по завершении процесса.

В качестве расходных материалов используются различные термопластики и композиты, включая ABS, PLA, поликарбонаты, полиамиды, полистирол, лигнин, полифенилсульфон, полиэфиримид и многие другие. Некоторые производные полиэфиримида обладают высокой огнеупорностью, что делает их пригодными для использования в аэрокосмической отрасли. Как правило, различные материалы предоставляют выбор баланса между определенными прочностными и температурными характеристиками.

Моделирование методом послойного наплавления (FDM) применяется для быстрого прототипирования и быстрого производства. Быстрое прототипирование облегчает повторное тестирование с последовательной, пошаговой модернизацией объекта. Быстрое производство служит в качестве недорогой альтернативы стандартным методам при создании мелкосерийных партий.

FDM является одним из наименее дорогих методов 3D печати, что обеспечивает растущую популярность бытовых принтеров, основанных на этой технологии. В быту 3D-принтеры, работающие по технологии FDM, могут применяться для создания самых разных объектов целевого назначения, игрушек, украшений и сувениров.

3.6. Технология изготовления объектов методом ламинирования (LOM)

Изготовление объектов методом ламинирования (LOM) – технология быстрого прототипирования, разработанная компанией HelisysInc. Метод подразумевает последовательное склеивание листового материала (бумаги, пластика, металлической фольги) с формированием контура каждого слоя с помощью лазерной резки (рис. 3.6). Объекты, производимые этим методом, обычно подлежат дополнительной механической обработке после печати. Толщина наносимого слоя напрямую зависит от толщины используемого листового материала.

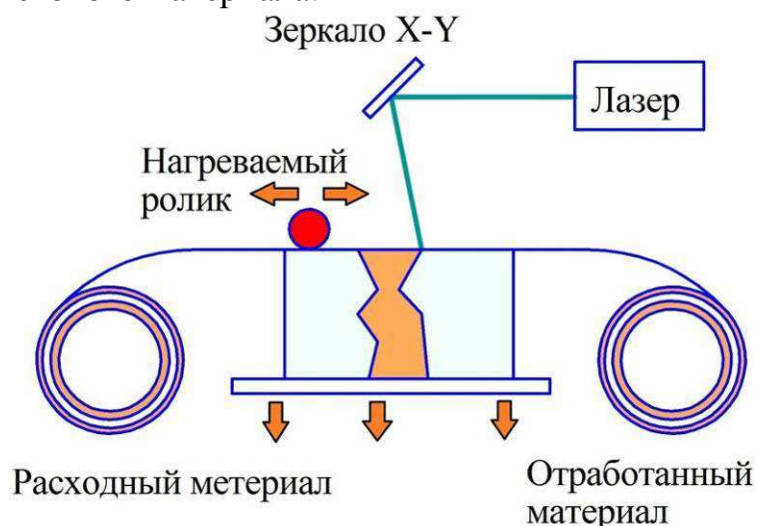


Рис. 3.6. Изготовление объектов с использованием технологии ламинирования (LOM)

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

Процесс печати протекает следующим образом: лист материала с клейким покрытием наносится на рабочую платформу (или нижние слои модели) с помощью разогретого ролика. Контур слоя вычерчивается с помощью лазера. Затем лишний материал режется лазером на мелкие секции для упрощения процедуры удаления, и платформа с готовым слоем

передвигается вниз. После в рабочую камеру подается новый лист материала. Платформа поднимается вверх до контакта с новым материалом.

Так цикл повторяется до завершения постройки модели, после чего лишний материал удаляется, и производится завершающая механическая обработка изделия (сверление, шлифовка и пр.)

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

3.7. Технология многоструйного моделирования MJM

Технология многоструйного моделирования (MJM) – фирменный метод аддитивного производства, запатентованный компанией 3DSystems. Технология используется в линейке профессиональных принтеров ProJet.

Технология MJM позволяет осуществлять высокоточное прототипирование с высоким уровнем детализации.

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

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

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

Технология позволяет добиваться исключительно высоких показателей точности, сравнимых с лазерной стереолитографией (SLA) – минимальная толщина наносимого слоя может составлять 16 микрон, а разрешение печати в горизонтальной плоскости достигает 750x750x1600 DPI.

Ранние модели MJM принтеров использовали обычные термопластики. Развитие и совершенствование фотополимерных материалов привело к постепенной замене термопластиков фотополимерными смолами и восками.

Принтеры ProJet используют ассортимент материалов марки VisiJet, включающий в себя воски и фотополимерные смолы с различными механическими свойствами.

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

3.8. Технология масочной стереолитографии (SGC)

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

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

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

Основным преимуществом SGC является отсутствие необходимости в построении поддерживающих структур, как в случае с такими

стереолитографическими методами, как SLA или DLP. В дополнение к высокому разрешению по горизонтали, механическая обработка каждого наносимого слоя позволяет добиваться высокой точности по оси Z. Наконец, технология отличается достаточно высокой производительностью за счет одновременного облучения целых слоев. Среди недостатков следует отметить достаточно высокую шумность и большое количество отходов, повышающее себестоимость печати. Сами же установки достаточно дороги ввиду сложности конструкции. В последнее время метод SGC почти не используется, а его вариация FTI стала практически неотличима от цифровой светодиодной печати (DLP) ввиду внедрения цифровых проекторов.

3.9. Технология стереолитографии (SLA)

Стереолитография (SLA или SL) – технология аддитивного производства моделей, прототипов и готовых изделий из жидких фотополимерных смол. Отвердевание смолы происходит за счет облучения ультрафиолетовым лазером или другим схожим источником энергии.

Метод основан на облучении жидкой фотополимерной смолы лазером для создания твердых физических моделей (рис. 3.9). Построение модели производится слой за слоем. Каждый слой вычерчивается лазером согласно данным, заложенным в трехмерной цифровой модели. Облучение лазером приводит к полимеризации (т.е. затвердеванию) материала в точках соприкосновения с лучом.

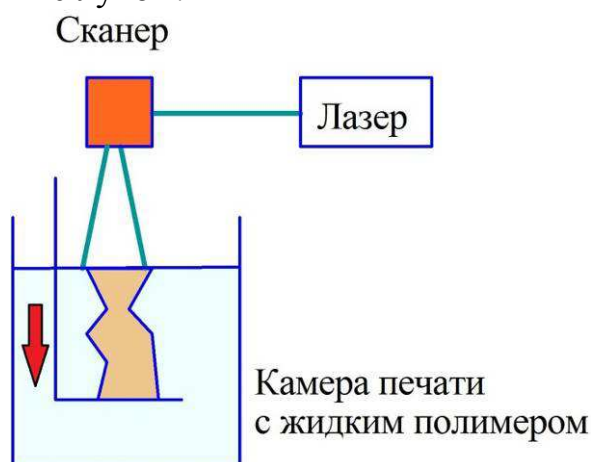


Рис. 3.9. Технология стереолитографии (SLA или SL)

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

необходимости, подвергаются обработке в ультрафиолетовой печи до полного затвердевания фотополимера.

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

Главным преимуществом стереолитографии можно считать высокую точность печати. Существующая технология позволяет наносить слои толщиной 15 микрон, что в несколько раз меньше толщины человеческого волоса. Точность изготовления достаточно высока для применения в производстве прототипов стоматологических протезов и ювелирных изделий. Скорость печати относительно высока, если учитывать высокое разрешение подобных устройств: время построения одной модели может составлять лишь нескольких часов, но в итоге зависит от размера модели и количества лазерных головок, используемых устройством одновременно. Относительно небольшие настольные устройства могут иметь область построения от 50 до 150мм в одном измерении. В то же время существуют промышленные установки, способные печатать крупногабаритные модели, где изделия измеряются уже в метрах. Готовые изделия могут обладать различными механическими свойствами в зависимости от заложенных характеристик фотополимера: существуют имитаторы твердых термопластиков, резины и других материалов.

Стереолитография позволяет создавать детали высокой сложности, но зачастую имеет высокую стоимость за счет относительно высокой цены расходных материалов. Один литр фотополимерной смолы может стоить от \$80 до \$160, в то время как стоимость устройств может варьироваться от \$10 000 до \$500 000.

3.10. Технология выборочной лазерной плавки SLM

Выборочная лазерная плавка (SLM) – метод аддитивного производства, использующий лазеры высокой мощности (как правило, иттербиевые волоконные лазеры) для создания трехмерных физических объектов за счет плавки металлических порошков.

Официальным термином для описания технологии является «лазерное спекание», хотя он несколько не соответствует действительности, так как расходные материалы подвергаются не спеканию, а полной плавке до образования гомогенной массы. Альтернативно, процесс может называться прямым лазерным спеканием металлов (DMLS) в случае использования металлических порошков, а

также LaserCUSING (фирменное название, бренд компании Concept Laser GmbH). Схожим методом является электронно-лучевая плавка (EBM), использующая электронные излучатели вместо лазеров.

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

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

Типичные представители устройств семейства SLM имеют рабочие камеры размером порядка 250мм в одном измерении, хотя технологических ограничений на размер области построения нет. Наиболее популярными материалами являются порошковые металлы и сплавы, включая нержавеющую сталь, инструментальную сталь, кобальт-хромовые сплавы, титан, алюминий, золото и др.

Технология выборочной лазерной плавки применяется для построения объектов сложной геометрической формы, зачастую с тонкими стенками и полостями. Возможность комбинирования гомогенных и пористых структур в одном объекте полезна при создании имплантатов – например, ацетабулярных чашек или других ортопедических имплантатов с пористой поверхностью, способствующей остеоинтеграции (сращиванию с костной тканью). Кроме того, SLM успешно применяется в аэрокосмической отрасли, позволяя создавать высокопрочные элементы конструкций, недостижимые по геометрической сложности для традиционных механических методов изготовления и обработки (фрезеровки, резки и т.д.). Качество готовых изделий настолько высоко, что механическая обработка готовых моделей почти не требуется. Побочным положительным эффектом служит экономия материалов, ибо SLM в силу своей специфики является практически безотходным производством.

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

стороны, отсутствие сварочных швов благоприятно влияет на прочность изделий.

3.11. Технология выборочного лазерного спекание (SLS)

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

Технология выборочного лазерного спекания (SLS) была разработана Карлом Декардом и Джозефом Биманом из Университета Техаса в Остине в середине 1980-х.

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

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

В отличие от таких методов аддитивного производства, как Стереолитография (SLA) или моделирования методом послойного наплавления (FDM), SLS не требует построения опорных структур. Навесные части модели поддерживаются неизрасходованным материалом. Такой подход позволяет добиться практически неограниченной геометрической сложности изготавливаемых моделей.

Некоторые SLS устройства используют однородный порошок, производимый с помощью барабанно-шаровых мельниц, но в большинстве случаев используются композитные гранулы с тугоплавким ядром и оболочкой из материала с пониженной температурой плавления.

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

Технология SLS получила широкое распространение по всему миру благодаря способности производить функциональные детали сложной геометрической формы. Хотя изначально технология создавалась для быстрого прототипирования, в последнее время SLS применяется для мелкосерийного производства готовых изделий. Достаточно неожиданным, но интересным применением SLS стало использование технологии в создании предметов искусства.

3.12. Технология производства электронно-лучевой плавкой (EBF□)

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

Концепция EBF3 основана на постройке «практически готовых форм» («Near-net-shape» в англоязычной терминологии). Это означает, что изделия создаются на основе трехмерных цифровых моделей с настолько высокой точностью, что механическая обработка и доводка изделий практически не требуется. Современные производственные методы с использованием программного управления основываются на обработке трехмерной цифровой модели для создания алгоритмов, используемых в машинной обработке (G-code). Алгоритмы служат для определения траектории движения режущих инструментов в процессе создания готового изделия из болванки. В случае с EBF□ процесс имеет прямо противоположное направление: те же самые цифровые модели

используются для выработки производственных алгоритмов, регулирующих не удаление лишней массы, а нанесение необходимого материала. Технология использует электронные излучатели высокой мощности в вакуумной камере для плавки металла. Электронный пучок передвигается по рабочей поверхности, повторяя контуры цифровой модели, в то время как металлическая проволока постепенно подается в точку фокусирования пучка. Расплавленный материал немедленно застывает, формируя прочные слои заданной модели. Процесс повторяется до построения цельной модели, требующей лишь минимальной обработки внешней поверхности. Технология EBF[□] позволяет создавать объекты размером от нескольких миллиметров до нескольких метров. Практические ограничения по объему построения накладываются физическими размерами вакуумной рабочей камеры и количеством доступного расходного материала.

4. Аппаратурная база аддитивных технологий, классификация, принцип действия, особенности эксплуатации

3D печать развивается быстрыми темпами и находит применение не только в области дизайна и машиностроения, но и в аэрокосмической промышленности, медицине, строительстве и многих других областях. Рассмотрим классификацию оборудования для быстрого прототипирования по уровню применяемости.

Потребительский уровень. Тип принтеров, который предназначен, в основном, для личного использования. Поставляется в виде отдельных узлов или в собранном виде. Подавляющее большинство моделей принтеров такого типа являются производной от open source проекта RepRap. Устройство и характеристики таких принтеров не сильно отличаются друг от друга.

Системы управления принтерами потребительского уровня оснащены простым и интуитивно понятным интерфейсом. Печатают, как правило, ABS и PLA пластиком. Такие принтеры могут производить объекты низкой и средней сложности с невысокой точностью. Ценовой диапазон: 500\$ - 3500\$. Принтеры потребительского уровня ориентированы на дизайнеров, художников, изобретателей, для домашнего использования.

Персональный уровень. Пограничный класс принтеров, который является домашним, но в то же время относится к нижней ступени промышленных принтеров для бизнеса. Эти устройства имеют много общего с принтерами потребительского класса, но обладают более высоким качеством и точностью печати. Появление таких принтеров, это скорее реакция крупных производителей на растущий рынок домашних систем. Учитывая низкую точность потребительского класса, вендоры

предложили уменьшенные модели профессиональных систем с близкими к ним показателями. Управлять принтерами этого класса так же просто и сводится к загрузке образа модели и нажатию кнопки «пуск». В то же время это ограничивает возможности в плане различных дополнительных параметров печати. Ценовой диапазон принтеров персонального уровня: 7000\$ - 40 000\$. Ориентированы на малый бизнес с небольшим бюджетом, у которого есть потребность в периодическом использовании 3D печати. Это могут быть инженерные компании, дизайн студии, маркетинговые агентства.

Профессиональный уровень. Системы этого класса уже не выглядят компактными, и имеют более внушительные размеры. В профессиональных принтерах используют передовые разработки в области технологии 3D печати. Предназначение профессиональных систем может быть очень разным, от прототипирования до полномасштабного производства, что в свою очередь делает их отличным вариантом как для крупного бизнеса, так и для высокотехнологичных компаний с малым штатом сотрудников.

В отличие от принтеров более низкого класса, профессиональные принтеры, ввиду большого количества режимов и дополнительных опций, требуют наличие персонала высокой квалификации. Такие принтеры устанавливаются в специальных помещениях с хорошей вентиляцией.

Профессиональные принтеры представляют собой комплексы, которые обеспечивают высокое качество печати и увеличенные, по сравнению с младшими классами, области печати. Такие принтеры могут оснащаться несколькими печатающими головками и иметь термостатичные камеры для печати полимерами, имеющими высокую термическую усадку.

Ценовой диапазон профессиональных принтеров: 30 000\$ - 750 000\$. Принтеры ориентированы на компании, у которых присутствует постоянная потребность в прототипировании, моделировании, изготовлении разного рода объектов с высокими показателями качества и точности.

Производственный уровень. Название класса говорит само за себя. Эти машины являются совокупностью точности и качества профессиональных принтеров, большой площадью печати, высокого уровня автоматизации и контроля процессов. На них, как и на профессиональных установках, можно печатать не только прототипы, но и конечный потребительский продукт.

Производственные принтеры устанавливаются в специально оборудованных цехах и используются в высокотехнологичном производстве, которое может быстро менять профиль выпускаемой продукции и использовать в качестве материалов не только полимеры, но и металлы. Ценовой диапазон производственных принтеров: 300 000\$ -

1 000 000\$. Применение таких принтеров ориентировано на компании с потребностью в производстве высокоточных продуктов большого размера, либо на компании с потребностью в производстве большого количества менее объемных предметов с высокой точностью и высоким уровнем качества.

3D ручка. Отдельно можно вынести дизайнерское оборудование, к которому относится 3D-ручка. Первенцем нового направления развития 3D печати стала ручка 3Doodler от компании Wobbleworks. Команда обратилась к площадке Kickstarter для сбора средств, необходимых для воплощения проекта в жизнь. Поставив целью собрать \$30 000, компания Wobbleworks сумела получить более двух миллионов долларов к моменту окончания кампании, что говорит о высоком интересе публики. На фоне успеха 3Doodler прокатилась конкурентная волна. На данный момент ассортимент 3D-ручек включает в себя фактические клоны 3Doodler - такие, как 3DYAYA или SwissPen, а также более оригинальные разработки, включая Dim3W и LIX. Основной принцип работы всех этих устройств одинаков, но имеются и некоторые конструктивные особенности, направленные на совершенствование достаточно молодой концепции.

В сущности, 3D-ручка есть не что иное, как ручной экструдер. В роли ЧПУ станка выступает сам пользователь. Основные элементы 3D ручки: сопло, механизм подачи пластиковой нити, нагревательный элемент, вентилятор для охлаждения верхней части сопла и ручки в целом, микроконтроллер для управления работой вентилятора, механизма подачи и нагревательного элемента. Так как практически все программные функции выполняет сам пользователь, 3D ручки не требуют соединения с компьютером или создания цифровых моделей. Требуется лишь электропитание. Как правило, используются обычные блоки питания с преобразователем напряжения 12 В. Как и в FDM принтерах, нагрев сопла занимает несколько минут, после чего ручка готова к печати. Подача материала осуществляется при нажатии соответствующей кнопки. Некоторые модели, например Dim3W, оснащаются регулятором скорости печати.

Также возможно наличие реверса протягивающего механизма. Эта функция позволяет быстро извлекать пластиковую нить из ручки и заменять ее материалом другого цвета.

На данный момент в качестве материалов для 3D-ручек используются два самых популярных пластика в FDM 3D печати - ABS-пластик и органический, биоразлагаемый полилактид (PLA-пластик). Возможно применение и других материалов - поликарбоната, нейлона и т.д. В то же время, существующие модели не дают возможности точной регулировки температуры сопла, важной при переходе на другие материалы. Температурные характеристики заложены в прошивке. В

будущем можно ожидать большего разнообразия ассортимента материалов и возможность точной настройки температуры.

Как и полноценные FDM принтеры, 3D-ручки используют термопластиковые нити диаметром 1,75 или 3мм. Для удобства работы с ручкой, нити, как правило, поставляются в виде обрезков, а не катушек, но в конечном итоге все зависит от выбора пользователя.

3D ручки позиционируются, как средство для творческой работы, трехмерного рисования. Хотя устройства действительно могут выполнять такую роль, создание качественных моделей требует серьезной сноровки.

Изначально 3D-ручки задумывались совсем для другой цели, аналогичной с целью своих прародителей – термоклеевых пистолетов. Речь идет о ремонте. Дело в том, что некоторые виды пластиков, используемых в FDM3D-печати (например, весьма популярный ABS-пластик), имеют высокую степень усадки и склонность к деформациям при неравномерном охлаждении. Все это зачастую приводит к растрескиванию изготавливаемых моделей. 3D-ручки должны были стать инструментом для ручного ремонта напечатанных моделей. Эти устройства позволяют заполнять пропущенные слои или разломы.

Особенно хороших результатов можно добиться при аккуратной обработке трещин ацетоном, растворяющим ABS-пластик. Размягченная таким образом поверхность будет хорошо схватываться со свеженанесенным с помощью 3D-ручки пластиком. Поверхность отремонтированного участка можно выровнять за счет шлифовки и аккуратной обработки тем же ацетоном. Аналогичным образом можно подвергнуть ремонту и бытовые изделия - многие из них выполняются из того же ABS-пластика, получившего широкое распространение в промышленности. Что же касается применения в художественных целях, 3D ручки придутся по душе тем, кто любит рисовать и желает перейти с двумерных зарисовок к трехмерным физическим моделям.

Основная сложность заключается в человеческих ограничениях - любое нежелательное движение руки отразится на качестве исполнения модели, особенно при рисовании модели «в воздухе».

Одним интересным способом повышения качества стало деление моделей на составные части с использованием зарисовок на бумаге в качестве шаблонов. Готовые же детали просто склеиваются вместе.

Весьма многообещающей является возможность применения разновидности 3D ручек в медицине.

Такие устройства, называемые «биоручками» (BioPen) испытываются в качестве инструментов для нанесения слоев живых клеток, смешанных с биополимерами, выполняющими роль поддерживающих матриц и содержащих необходимые питательные вещества.

Оригинальная 3D-ручка BioPen была разработана австралийскими учеными из ASEC и предназначена для ремонта хрящевых и костных тканей.

При хирургическом вмешательстве BioPen позволяет врачам «закрашивать» поврежденные участки костной или хрящевой ткани, стимулируя восстановительный процесс.

5. Особенности печати по FDM технологии (автор Бойцов Е. П.)

Интерес к 3D печати растет большими темпами, большинство людей приобретают 3D принтеры для дома либо собирают их самостоятельно на основе проекта RepRap. Практически все домашние принтеры основаны на FDM технологии, которая обладает своими особенностями.

Не важно, какой 3D принтер имеется – собранный дома или на предприятии, сразу подключив его и напечатать модель не получится, необходимо иметь некоторые навыки подготовки модели к печати и работы с материалами для печати.

К тому же 3D печать по FDM технологии имеет свои ограничения.

После ознакомления с устройством 3D принтера, предметно поговорим об особенностях, достоинствах и недостатках 3D печати.

Размеры и разрешение модели

Далеко не все изделия можно напечатать, так как печать ограничена размерами области печати и разрешением печати. Разрешение зависит от конструкции принтера, технологии FDM и от установленного сопла экструзионной головки. Минимально возможные для печати на данный момент времени сопла с диаметром 0,2 мм. Не все конструкции принтеров позволяют печатать минимальными слоями, распространенная минимальная толщина слоя 0,05 мм. При настройках принтера на минимальную толщину слоя, на процесс печати затрачивается очень большое количество времени.

Перегрев модели

В технологии FDM подача пластичной массы осуществляется при температурах 180 - 260 °C. При печати одной детали небольших размеров происходит перегрев и искривление модели, поэтому необходимо охлаждать (обдуть) область печати. Для этих целей в принтере должна быть предусмотрена специальная система охлаждения. Возможно обойтись без такой системы – размещать две (или более) небольших модели на значительном расстоянии друг от друга, чтобы нанесенный слой пластика успевал полимеризоваться (остывать) перед нанесением на него следующего слоя. Пример такой неудачной печати представлен на рисунке 5.1.

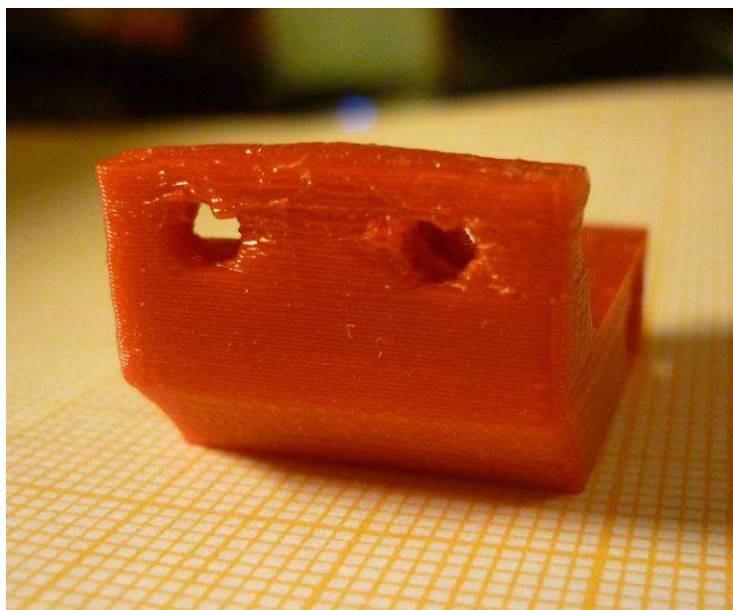


Рис. 5.1. Перегрев модели малых размеров при 3D печати

Для создания миниатюрных деталей используют другой принцип печати, к примеру, SLA.

Поддержки

Одним из ограничений 3D-печати является невозможность «печати по воздуху», что осложняет создание навесных элементов. Такие технологии, как выборочное лазерное спекание (SLS), решают эту проблему за счет использования порошковых материалов распределяемых по всей площади рабочей камеры – неизрасходованный материал одного слоя служит поддержкой для элементов следующего слоя.

В технологии FDM печати материал наносится выборочно. Соответственно, навесные элементы могут не иметь достаточной опоры – все зависит от угла отклонения и разрешения печати, но даже при оптимальном разрешении печать горизонтальных элементов большой длины (так называемых «мостов») возможна только в ущерб качеству или невозможна вообще. В таких случаях создаются искусственные временные конструкции, называемые «опорами», «поддержками» или «supports», которые удаляются по завершении печати.

Поддержки иногда моделируют при дизайне модели, чаще они генерируются в программе-слайсере.

Пример поддержек для нависающих элементов детали представлен на рисунке 5.2.

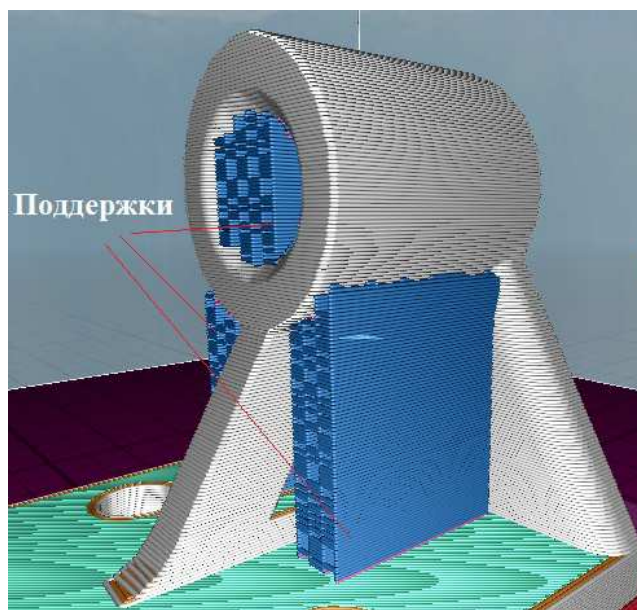


Рис. 5.2. Поддержки для нависающих элементов детали

К поддержкам есть определенные требования: они должны удерживать пластик, а затем без особых проблем отделяться.

Если печатать модель и поддержки из одного материала, то после печати поддержки необходимо удалить механически.

К сожалению, механическое удаление таких конструкций оставляет следы на готовой модели, что приводит к необходимости последующей механической (опиливание, шлифование) и/или химической обработки. В худшем же случае, опоры могут вообще оказаться вне досягаемости механических инструментов. Последнее возможно при создании моделей со сложной открытой внутренней структурой [12].

Если печатать модель и поддержки из разных материалов, то можно удалять поддержки с помощью химической обработки. При этом поддержки должны печататься из растворимого материала. Такими материалами являются пластики PVA (растворимый в воде) или HIPS (растворимый в лимонене). После печати модель с поддержками погружаются в растворитель, в котором растворяется только материал поддержки. После растворения, деталь получается без дефектов от поддержек.

Бrimы и рафты

Еще одна проблема FDM принтеров — неровная платформа и плохая адгезия пластика к платформе. Эта проблема может быть частично решена с помощью дополнительных элементов, прилегающих к модели, которые называют бримы (brim) и рафты (raft). Об особенностях их использования говорится в главе 7 настоящего пособия.

Цветная FDM печать

FDM 3D принтеры имеют ограничения по созданию моделей из пластиков разных цветов одновременно. Большинство моделей печатается пластиком одного цвета. Имеются принтеры, оснащенные двумя (рис. 5.3) реже тремя и более экструзионными головками.

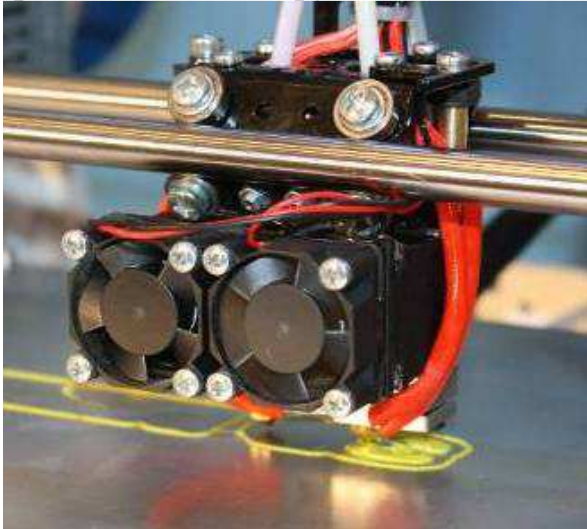


Рис. 5.3. Экструзионный узел «3D Life», снабженный двумя головками

В таких конструкциях возможна печать с количеством цветов, равным количеству экструзионных головок. Пример многоцветной FDM печати представлен на рисунке 3.5.2 справа. Многоцветная печать возможна также на принтере, оснащенном одной головкой. Сначала модель печатается одним цветом, делается пауза в печати, производится замена филамента на другой цвет и продолжается печать до следующей замены филамента или до окончания печати.

Есть конструкции экструзионных головок с одним соплом, к которому подводится несколько филаментов различных цветов. В таких конструкциях возможно производство смешения цветов подаваемого пластика.

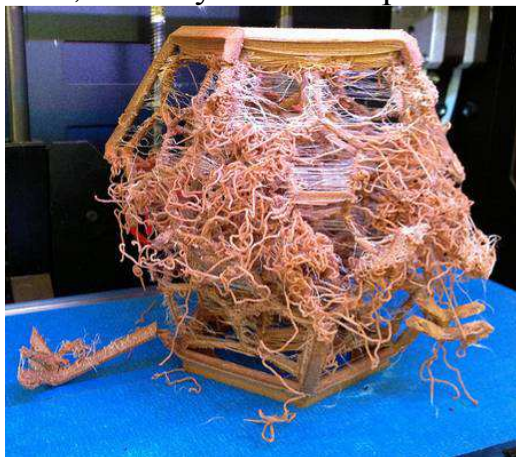
У экструзионных узлов, снабженных несколькими головками, имеется возможность печатать разными материалами. К примеру, можно печатать поддержки из водорастворимого PVA пластика, а основную деталь из ABS. В том случае отпадает необходимость механической обработки готовой модели по удалению поддержек, так как их можно растворить в теплой воде, а модель из основного пластика остается неповрежденной.

Качество и точность изготавливаемой детали зависит от технических характеристик принтера и настроек печати (высота слоя, скорость печати и другие).

Неверные настройки печати приводят к некачественной печати. Ошибки, допущенные при настройке печати, могут проявляться в мягкой и

грубой формах. В мягкой форме ошибки проявляются в небольших отклонениях размеров (рис. 5.1) между напечатанным объектом и его виртуальной моделью. Ошибки печати такого рода могут быть исправлены с помощью последующей механической и (или) химической обработки объекта.

При грубых ошибках печати (рис. 5.4) форма объекта искажается очень сильно или происходит сбой печати. Ошибки печати такого рода, как правило, не могут быть исправлены.



а



б

Рис. 5.4. Ошибки печати: а – неправильная настройка или отсутствие поддержек; б – сдвиг печати по одной оси

На качество изделия также влияет используемый материал для трехмерной FDM печати, так каждый вид материала имеет свои свойства и особенности при печати.

6. Материалы для FDM печати

Существует большое число материалов, которые применимы для трехмерной FDM печати. На сегодняшний день основную роль в этой нише занимают два пластика — ABS и PLA, они являются самыми распространёнными в области FDM печати. Оба материала являются термопластичными при определенных температурах. Однако существует немало различных термопластов, которые применимы в этой технологии, и ассортимент их постоянно расширяется [16-24].

Пластики для FDM печати в основном выпускаются в виде прутка (филамента) диаметром 1,75 мм, намотанного на пластиковую катушку (рис. 6.1). Масса катушек от 0,2 до 1 кг.



Рис. 6.1. Пруток (филамент) диаметром 1,75мм ABS пластика

Рассмотрим свойства некоторых пластиков.

6.1. ABS пластик

ABS (акрилонитрилбутадиенстирол) – это термопластическая ударопрочная техническая смола, сополимер акрилонитрил-бутадиен-стирол. Название пластика образовано из начальных букв наименований мономеров. Пропорции могут варьироваться от 15 до 35 % акрилонитрила, от 5 до 30 % бутадиена и от 40 до 60 % стирола. ABS пластик может быть повторно переработан.

ABS пластик стал популярным в системах быстрого прототипирования благодаря своей температуре стеклования – достаточно высокой, чтобы не возникало нежелательных деформаций при небольшом нагреве в бытовых условиях, но достаточно низкой для безопасной экструзии с помощью 3D принтеров.

ABS применим в большей мере для создания технических деталей. Имеет большое разнообразие в цветовой палитре. Оптимальная температура печати данным материалом 230-250 °C.

Легко обрабатывается механически, есть возможность сглаживать химическими веществами, к примеру, ацетоном.

Распространена обработка данного материала парами ацетона, в так называемой «ацетоновой бане». Результат такой обработки представлен на рисунке 6.2.

Для печати данным материалом необходима подогреваемая платформа, а также термостатичная камера, так как из-за неравномерности температуры окружающей среды возможны расслоения между слоями материала вследствие усадки при полимеризации пластика.



Рис. 6.2. Ацетоновая обработка ABS пластика

Приведем свойства ABS:

- обладает более высокой стойкостью к ударным нагрузкам по сравнению с полистиролом, превосходит его по механической прочности и жесткости;
- хорошая износостойкость;
- нетоксичность в нормальных условиях;
- стоек к влаге, щелочам, смазочным маслам, растворам неорганических солей и кислот, углеводородам, жирам, бензину;
- растворяется в ацетоне, эфире, бензоле, этилхлориде, этиленхлориде, анилине, анизоле;
- не стоек к ультрафиолетовому излучению;
- характеризуется ограниченной устойчивостью против атмосферных воздействий и пониженными электроизоляционными свойствам и по сравнению с полистиролом;
- выдерживает кратковременный нагрев до 90-100 °С (до 113 °С у модифицированных марок);
- максимальная температура длительной эксплуатации: 75 – 80 °С;
- широкий диапазон эксплуатационных температур (от –40 °С до +90 °С);
- пригоден для нанесения гальванического покрытия, для вакуумной металлизации.

Физико-механические свойства ABS-пластика

Наименование	Значение
Плотность	1,02-1,08 г/см ³

Прочность при растяжении	35-50 МПа
Прочность при изгибе	50-87 МПа
Прочность при сжатии	46-80 МПа
Относительное удлинение	10-25 %
Усадка (при изготовлении изделий)	0,4-0,7 %
Влагопоглощение	0,2-0,4 %
Модуль упругости при растяжении при 23 °С	1700 - 2930 МПа
Ударная вязкость по Шарли (с надрезом)	10-30 кДж/м ²
Твердость по Бринеллю	90-150 МПа
Теплостойкость по Мартенсу	86-96 °С
Температура размягчения	90-105 °С
Максимальная температура длительной эксплуатации	75-80 °С
Диапазон технологических температур	200-260 °С
Диэлектрическая проницаемость при 106 Гц	2,4-5,0
Тангенс угла диэлектрических потерь при 106 Гц	(3-7)·10 ⁻⁴
Удельное объемное электрическое сопротивление	5·10 ¹³ Ом/м
Электрическая прочность	12-15 МВ/м
Температура самовоспламенения	395 °С

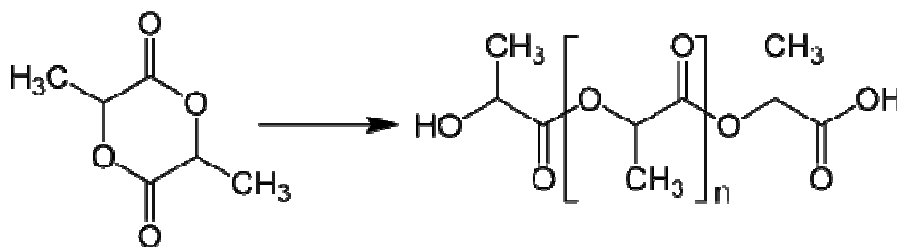
Пример печати из ABS пластика представлен на рисунке 3.5.2 а.

6.2. PLA пластик

PLA (Polylacticacid), Полилактид (ПЛА) – биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Сырьем для производства служат ежегодно возобновляемые ресурсы, такие как кукуруза, сахарный тростник, сахарная свёкла, пшеница. Популярный материал для 3D печати. Используется для производства изделий с коротким сроком службы (пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара), а также в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов.

Существует два способа синтеза полилактида: **поликонденсация** молочной кислоты и **полимеризация** лактида. В промышленности используется их комбинация. Поликонденсацией молочной кислоты можно получать только низкомолекулярный полилактид, так как в процессе выделяется побочный продукт – вода, отвести которую из реакции сложно, и поэтому растущая полимерная цепь разрушается. Получившийся низкомолекулярный полилактид деполимеризуют до **димера** молочной кислоты, лактида. Полученный лактид полимеризуют

при высокой температуре с добавлением катализатора **октаноата олова**, получая высокомолекулярный полилактид.



Полимеризация лактида с раскрытием цикла.

И **молочная кислота**, и лактид проявляют **оптическую активность**, то есть существуют в виде двух L- и D- **стереоизомеров**, являющихся зеркальным отображением друг друга. Варьируя относительное содержание этих форм в полилактиде, можно задавать свойства получаемого полимера, а также получать различные классы полилактидных материалов. Полилактид из 100 % L-лактида (**L-ПЛА**) имеет высокую степень стереорегулярности, что придает ему **кристалличность**. **Температура стеклования** L-ПЛА: 54—58 °C^[2], температура **плавления** 170—180 °C, скачок **теплоёмкости** 100 % аморфного ПЛА 0,54 Дж/(г·К). Используя при полимеризации смесь D- и L- форм лактида, получают аморфный полилактид (**L,D-ПЛА**), температура стеклования которого составляет 50—53 °C^[3], плавление отсутствует, так как нет кристаллической **фазы**.

Самая высокая температура плавления у стереокомплекса, состоящего из чистого L-ПЛА и чистого D-ПЛА. Две цепочки сплетаются, и образующиеся дополнительные взаимодействия между ними ведут к повышению температуры плавления (до 220 °C).

Физико-механические свойства PLA Пластика

Величина	Значение
Температура печати	200-220 °C
Температура плавления	173-178°C
Температура размягчения	50°C
Твердость (по Роквеллу)	R70-R90
Относительное удлинение при разрыве	3,8%
Прочность на изгиб	55,3 МПа
Прочность на разрыв	57,8 МПа

Величина	Значение
Модуль упругости при растяжении	3,3 ГПа
Модуль упругости при изгибе	2,3 ГПа
Температура стеклования	60-65°C
Плотность	1,23-1,25 г/см ³
Минимальная толщина стенок	1 мм
Точность печати	± 0,1%
Размер мельчайших деталей	0,3 мм
Усадка при изготовлении изделий	нет
Влагопоглощение	0,5-50%

Полилактид применяется для производства экологически чистой биоразлагаемой упаковки, одноразовой посуды, средств личной гигиены. Биоразлагаемые пакеты из полилактида используются в таких крупных торговых сетях как [Wal-Mart](#), [Stores](#) и [Kmart](#). Ввиду своей биосовместимости, полилактид широко применяется в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов, а также в системах доставки лекарств.

Полилактид отвечает концепции [устойчивого развития](#), так как для его синтеза используются ежегодно возобновляемые природные ресурсы. Упаковочные изделия из полилактида — экологически чистая альтернатива традиционной бионеразлагаемой упаковке на основе нефти.

Полилактид также применяется в [3D-принтерах](#) в качестве исходного материала для печати.

Самый крупный производитель L-ПЛА — американская компания Nature Works (140 000 тонн/год). Также ПЛА производится компанией [Toyota](#) ([Япония](#)), [Hitachi](#) ([Япония](#)), [DuPont](#) ([США](#)), [Galactic](#) ([Бельгия](#)), [Hisun Biomaterials](#) ([Китай](#)), а основной производитель L,D-ПЛА - компания PURAC ([Нидерланды](#)). С 2015 года в России налажено производство медицинского высокочистого PLA на мощностях АО "ВНИИСВ".

PLA пластик имеет большое разнообразие в цветовой палитре. Применим в основном для печати различного рода изделий дизайнерского исполнения (скульптуры, фигуры, вазы и т.п.). Для создания механических деталей тоже применим, в особенности для скользящих втулок (подшипники скольжения), так как обладает малым коэффициентом трения.

PLA пластик не токсичен, поэтому из него можно делать игрушки для детей. Отлично подходит для печати больших и маленьких объектов. Хорошо сочетается с ABS пластиком как поддерживающий материал.

Достоинства PLA пластика в том, что это экологичный материал, не требует подогреваемой поверхности стола, а при печати довольно быстро охлаждается, что снижает деформации модели при застывании. Для улучшения охлаждения применяют воздушный обдув с помощью вентиляторов.

Основные недостатки PLA пластика - биологически разлагаемый, малый срок службы в районе 2-х лет (активно процесс разложения происходит при повышенных влажности и температуре), имеет трудности при обработке, так как более плотный материал по сравнению с ABS.

Типовой технологический процесс производства PLA предполагает, что при полимеризации лактонов используются металлосодержащие катализаторы, которые являются опасными для здоровья и окружающей среды.

Примеры печати из PLA пластика представлены на рисунках 3.5.2 б и 6.3.

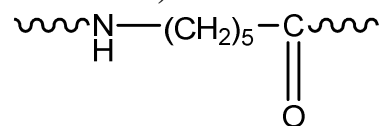


Рис. 6.3. Примеры объектов из PLA пластика

6.3. Нейлон (Nylon) –полиамид.

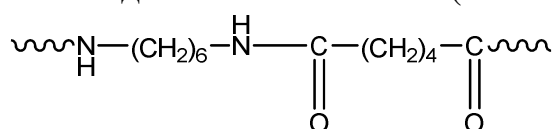
Полиамид – крупнотоннажный термопластичный полимер конструкционного назначения. Наиболее распространен полиамид-6 на основе капролактама. Свойства полиамидов хорошо изучены и описаны.

Поли-ε-капроамид (капрон) – продукт полимеризации ε-капролактама в расплаве в присутствии воды или металлического натрия в (капрон и капролон соответственно):



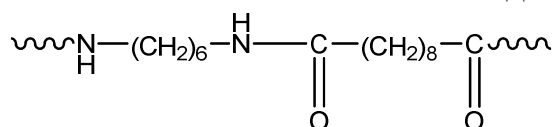
$M = 10 \div 40$ тыс. Выпускается под маркой ПА-6 (капрон). За рубежом имеет названия найлон-6, нейленина, фоста-найлон, капропан, пласкон (США), амилан (Япония), перлон L, игамид D (Германия), грилон (Швейцария).

Полигексаметиленадипамид (анид) получают поликонденсацией продукта взаимодействия эквимольных количеств адипиновой кислоты и гексаметилендиамина в метаноле (соль АГ).



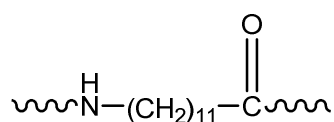
$M = 15 \div 40$ тыс. Выпускается под маркой ПА-66 (анид). За рубежом имеет названия найлон-6,6, зайтель-101, зайтель-105 (США), маранил, лурон, сутрон, брулон (Англия), перлон, игамид А, энтарамид (Германия).

Полигексаметиленсебацинамид получают поликонденсацией себациновой кислоты и гексаметилендиамина.



$M = 8 \div 25$ тыс. Выпускается под маркой ПА-610. За рубежом имеет названия найлон-6,10, зайтель-31, зайтель-33 (США), перлон Н, энтарамид С (Германия).

Поли-ω-ундеканамид (полидодеканамид) получают полимеризацией додекалактама:



$M = 15 \div 40$ тыс. Выпускается под маркой ПА-12, стабилизированным в виде гранул. За рубежом имеет названия вестамид (Германия), гриламид (Швейцария), рильсан А (Франция).

Это полимеры с высоким уровнем межмолекулярного взаимодействия, обусловленного наличием большого количества водородных связей. Алифатические ПА являются гибкоцепными полимерами и кри-

таллизуются с большой скоростью. Степень кристалличности – 40–70%. Плотность изменяется от 1010 до 1130 кг/м³. Переход полимера в расплав происходит в узком интервале температур, вязкость низкая; $T_{\text{дестр}}=350^{\circ}\text{C}$.

ПА – полярные гидрофильные полимеры. Водопоглощение их достигает нескольких процентов. Они растворяются в сильных кислотах (в том числе в уксусной и муравьиной), фенолахидами; масло- и бензостойки, биологически инертны.

Комплекс свойств алифатических ПА определяется соотношением количеств амидных и метиленовых групп и соответственно числом водородных связей на единицу длины макромолекулы. В ряду ПА-12, ПА-610, ПА-6, ПА-66 концентрация водородных связей возрастает, число метиленовых групп (длина алифатической части) уменьшается. В этом ряду температуры плавления ПА повышаются от 180 до 260°C (у ПА-6 215–230° С), температуры стеклования от 40 до 60°C (у ПА-6 50°C). Механические (прочностные) характеристики, теплостойкость, растворимость в полярных растворителях, водопоглощение в этом ряду также возрастают. Диэлектрические характеристики, стабильность свойств и размеров уменьшаются.

ПА – это инженерные пластики. Они обладают высокими прочностью и ударной вязкостью в широком диапазоне температур; морозостойкость -60°C.

ПА – хорошие антифрикционные материалы. По износостойкости они превосходят ПТФЭ и СФД. Пленки из ПА прозрачны и не накапливают электростатических зарядов. Ниже приведены некоторые характеристики ПА:

δ_p , МПа	50–75	T_m , °C	55–65
δ_H , МПа	90–110	T_B , °C	180–220
n_B , МПа	90–110	n_D^{20}	1,54
a , кДж/м ²	100–140	ρ_v , Ом·м	$10^{12}–10^{14}$
$\delta_{сж}$, МПа	80–110	$tg\delta$ (при 10^6 Гц)	0,02–0,03
ε_p , %	100–250	$K_{тр}$ (по стали)	0,2–0,3

Основным недостатком ПА является большое водопоглощение. ПА не являются хорошими диэлектриками. Свойства и размеры изготовленных из них изделий зависят от влажности окружающей среды и, следовательно, нестабильны. ПА нестойки к УФ-излучению, горючи.

Основным методом переработки алифатических ПА является литье под давлением. Методом экструзии изготавливают пленки и шланги. Сушка перед переработкой обязательна. ПА хорошо свариваются, склеиваются.

ПА применяют для изготовления корпусных деталей, а также деталей, работающих в узлах трения, под нагрузкой: реже – кабельной изоляции.

Технология печати с использованием нейлона схожа с печатью ABS пластиком, но с некоторыми отличиями. Как и ABS-пластик, нейлон склонен к закручиванию и деформациям при неравномерном охлаждении, что требует использования подогреваемой платформы и термостатичной камеры.

Слои нейлона прекрасно схватываются, что минимизирует вероятность расслоения моделей. Прочность моделей из нейлона, полученных с помощью 3D принтера, находится на уровне аналогов, изготовленных традиционным методом литья под давлением.

Нейлон практически не поддается склеиванию, что затрудняет изготовление крупногабаритных деталей из составных частей. Как вариант, возможно соединение нейлоновых деталей за счет плавки соединяемых поверхностей.

Нейлон поддается окрашиванию с помощью красителей на кислотной основе.

Нейлон не схватывается со стеклом и другими гладкими поверхностями, поэтому при печати рекомендуется нанесение на рабочий столик малярного скотча, либо использование подложки из древесины.

Ввиду высокой гигроскопичности нейлона (способности впитывать влагу) рекомендуется просушка нейлоновых нитей непосредственно перед печатью. В противном случае возможно выделение водяного пара из сопла, что может повлиять на качество печати [10].

Температура печати от 235 до 280 °С. Оптимальная температура на большинстве скоростей печати: 240 – 250 °С.

Скорость печати зависит от принтера. Печать со скоростью от 28 до 34 мм/с в большинстве случаев дает хороший результат.



Рис. 6.3. Изделия из нейлона, напечатанные 3D принтером

6.4. Wood (Laywoo-D3)

Изобретатель Кай Парти разработал специальное деревянное волокно для 3D печати Wood или Laywoo-D3 – специальный расходный материал, рассчитанный на имитацию древесины, является композитом переработанного дерева (40%) и безопасного связующего полимера.

Изобретатель Кай Парти разработал специальное деревянное волокно для 3D печати. Волокно состоит из дерева и полимера и по своим свойствам похоже на полиактид (PLA). Комбинированный материал позволяет получить долговечные и твёрдые модели, которые внешне выглядят как деревянные изделия и имеют запах свежеспиленного дерева. В настоящее время инновационный материал используется только в самореплицирующихся принтерах RepRap.

Термическая стойкость материала подобна PLA, и им можно печатать в промежутке температур от 175°C до 250°C. Не требует климатического контроля рабочей камеры или подогрева столика. После печати он выглядит как изделие из дерева, пахнет деревом и приятен на ощупь. Готовое изделие можно обрабатывать резанием, шлифованием и красить. Меняя температуру можно даже напечатать годовые кольца как на дереве. При 180°C на выходе получается светлый оттенок, а при 245°C - темный.

Во время печати возможно делать поверхность грубой, гладкой или чередовать шероховатость.

Пример печати из данного вида пластика представлен на рисунке 6.4.

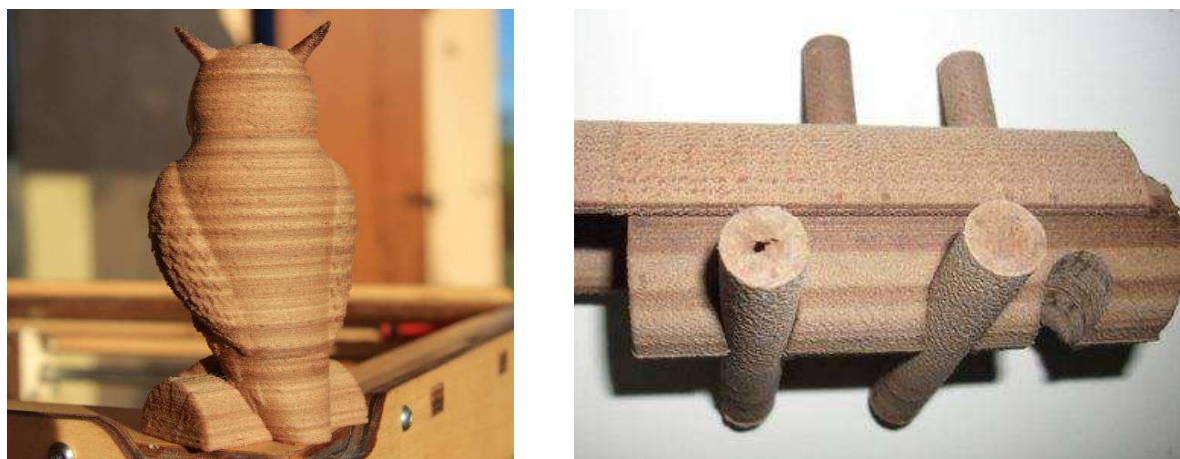


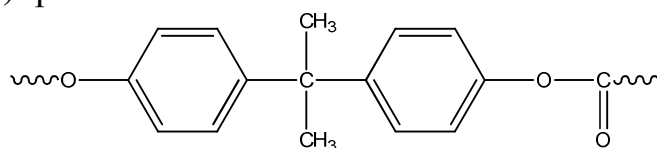
Рис. 6.4. Пример печати модели из пластика Laywoo-D3

Использование органических элементов в составе пластика Laywoo-D3 означает отсутствие вредных испарений при печати и нетоксичность готовых изделий, что позволяет печатать пищевую тару и игрушки [11].

6.5. Поликарбонат

Поликарбонат – термопластик, в соевом виде широко использующийся в качестве прочного заменителя обычного стекла. Кроме того, поликарбонат нашел применение в качестве материала для изготовления компакт-дисков, контактных линз, защитного снаряжения (например, велосипедных шлемов или очков). Комбинация прозрачности поликарбоната и высокой прочности (порядка 250 раз выше, чем у обычного стекла), позволяет изготавливать даже пуленепробиваемые стекла.

Поликарбонат (ПК) — сложный полиэфир угольной кислоты и 2,2-бис(4-оксифенил)пропана:



ПК главным образом получают межфазной поликонденсацией раствора фосгена в метиленхлориде со щелочным раствором 2,2-(4-оксифенил)пропана в присутствии катализатора.

ПК выпускается под марками ПК, дифлон и ДАК в виде прозрачных гранул (бесцветных или желтоватых), стабилизированным. За рубежом ПК имеет названия макролон (Германия), лексан, мерлон (США), пепплайт, юпилен, тоуфлон (Япония).

$M = 35 \div 100$ тыс. Регулярное строение макромолекул обеспечивает степень кристалличности до 10–40%. ПК кристаллизуется очень медленно и при переработке остается практически аморфным и прозрачным ($K_{св}$ до 90%); плотность – 1200 кг/м³.

ПК – слабополярный полимер с высоким уровнем межмолекулярного взаимодействия, обусловленным полярностью карбоксильных групп. Это обеспечивает высокую температуру стеклования (141–149°C) и плавления (220–230°C); $T_{дестр} = 380^\circ\text{C}$.

ПК устойчив к действию растворов кислот и слабых щелочей; растворяется в хлорированных углеводородах, фенолах, кетонах, тетрагидрофуране, диметилформамиде, диоксане, частично растворим в ароматических углеводородах; разлагается в сильных щелочах, аминах и низших спиртах; водо-, масло- и бензостоек. ПК нетоксичен, инертен к физиологическим средам, широко применяется для изготовления медицинских изделий и тары для пищевых продуктов.

ПК относится к термопластам инженерно-технического назначения. Это теплостойкий жесткий прочный материал, отличающийся высокой стойкостью к удару, стабильностью свойств и размеров в широком диапазоне температур (морозостойкость ниже -100°C). Стоек к УФ- и ионизирующим излучениям. Это хороший диэлектрик, самозатухающий материал. Ниже приведены некоторые характеристики ПК:

δ_p , МПа	56–78	T_M , °C	115–127
δ_{II} , МПа	80–110	T_B , °C	164–166
H_B , МПа	150–160	n_D^{20}	1,587
a , кДж/м ²	120–140	ρ_v , Ом·м	10^{15} – 10^{16}
$\delta_{сж}$, МПа	80–120	$tg\delta$ (при 10^6 Гц)	0,007–0,01
ε_p , %	50–110	$K_{тр}$ (по стали)	0,45

Несмотря на высокую вязкость, ПК перерабатывается литьем под давлением, экструзией, пневмоформованием. Тонкие пленки и волокна получают поливом из раствора, они хорошо склеиваются и свариваются. ПК применяется для изготовления прецизионных, оптически прозрачных, ударостойких изделий в электротехнической, медицинской промышленности, в приборостроении и др.

Еще одним достоинством поликарбоната служит высокая устойчивость к высоким и низким температурам – от -40 до 120 °C. Кроме того, поликарбонат склонен к затуханию при воздействии открытого огня, способствуя пожарной безопасности, и устойчив к воздействию кислот.

Среди недостатков поликарбоната можно выделить достаточно высокую гигроскопичность. Катушки с нитью рекомендуется хранить в сухих местах и, желательно, в вакуумной упаковке. Кроме того, поликарбонат несколько уязвим к ультрафиолетовому свету, что со временем приводит к потере прочности, и уязвим к воздействию нефтепродуктов и органических растворителей.

Его лучше печатать в разогретой камере, но и для печати небольших объектов подогреваемая площадка также допустима.

Поликарбонат имеет температуру стеклообразования примерно от 150 °C, далее при нагреве он размягчается и при температуре 300°C он течет.

Экспериментально было отмечено, чем больше скорость и выше температура, объект, в конечном результате, был напечатан более четким, и цвет был ближе к белому, а не прозрачному.

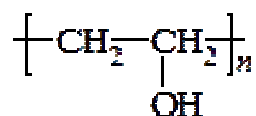
6.6. Темозластопластичные эластомеры

Темозластопластичные эластомеры, например TPE и NinjaFlex - это материал, объединяющий в себе свойства резины и пластика – эластичный пластик для 3D-принтера.

6.7. Поливиниловый спирт или PVA пластик

Поливиниловый спирт (ПВС, международное PVON, PVA или PVAL) — искусственный, водорастворимый, термопластичный полимер. Синтез ПВС осуществляется реакцией щелочного/кислотного гидролиза или алкоголиза сложных поливиниловых эфиров. Основным сырьем для получения ПВС служит поливинилацетат (ПВА). В отличие от большинства полимеров на основе виниловых мономеров, ПВС не может быть получен непосредственно из соответствующего мономера – винилового спирта (ВС).

Поливиниловый спирт (ПВС.) – карбоцепной полимер общей формулы



Свойства. ПВС. – твердый полимер белого цвета без вкуса и запаха, нетоксичен. ПВС. может кристаллизоваться при термообработке в интервале 80 – 225°C, достигая степени кристалличности 68%. Макромолекулы обычного ПВС. содержат 1,0 – 2,5% звеньев, присоединенных по типу «голова к голове», и имеют атактическое строение.

Молекулярная масса ПВС. в зависимости от способа получения лежит в пределах 5000 – 1000000. Зависимость между средневязкостной молекулярной массой $\overline{M}_w$ и характеристической вязкостью $[\eta]$ ПВС. в воде при 20°C выражается соотношением:

$$[\eta] = 8,86 \cdot 10^{-4} \cdot \overline{M}_w^{0,72}.$$

Молекулярно-массовое распределение определяется условиями получения исходного поливинилацетата.

Основные температурные показатели:

- температура стеклования: 85 °C;
- температура плавления: 220 – 232 °C;
- температура деструкции: около 230 °C.

В настоящее время промышленный синтез ПВС осуществляют путем полимераналогичных превращений, в частности, с использованием в качестве исходных полимеров простых и сложных поливиниловых эфиров, таких как ПВА. К основным способам получения ПВС можно отнести различные варианты омыления ПВА в среде спиртов или в воде в присутствии оснований и кислот.

Поливиниловый спирт, полученный из поливинилацетата, является тактическим полимером. Кристалличность ПВС обусловлена наличием большого числа гидроксильных групп в полимере. На кристалличность полимера также оказывают влияние предистория получения полимера, разветвленность, степень гидролиза и тип распределения остаточных ацетатных групп. Чем выше степень гидролиза, тем выше кристалличность образца ПВС. При термической обработке полностью омыленного продукта его кристалличность повышается и приводит к снижению его растворимости в воде. Чем выше число остаточных ацетатных групп в ПВС, тем меньше образование кристаллических зон. Исключением для растворимости является аморфизованный ПВС. Ввиду малой исходной кристалличности, полимер (независимо от молекулярной массы) превосходно растворяется в воде [23].

Физические свойства. Поливиниловый спирт является превосходным эмульгирующим, адгезионным и пленкообразующим полимером. Он обладает высокой прочностью на разрыв и гибкостью. Эти свойства зависят от влажности воздуха, так как полимер адсорбирует влагу. Вода действует на полимер как пластификатор. При большой влажности у ПВС уменьшается прочность на разрыв, но увеличивается эластичность. Температура плавления находится в области 230 °С (в среде азота), а температура стеклования 85 °С для полностью гидролизованной формы. На воздухе при 220 °С ПВС необратимо разлагается с выделением CO, CO₂, уксусной кислоты и изменением цвета полимера с белого на темно-коричневый. Температура стеклования и температура плавления зависят от молекулярной массы полимера и его тактичности. Так, для синдиотактического ПВС температура плавления лежит в области 280 °С, а температура стеклования для сополимера ПВС-ПВА с содержанием звеньев ПАВ 50-моль% находится ниже 20 °С. Аморфизованный ПВС не имеет характерной эндотермической области отвечающей за плавление кристаллической фазы, однако его термическое разложение идентично ПВС полученному классическим способом.

Поливиниловый спирт стабилен в отношении масел, жиров и органических растворителей.

ПВС применяют для формования волокон, для производства поливинилацеталей, шлихтования основ пряжи и аппретирования тканей, в качестве защитного коллоида для эмульгирования мономеров и стабилизации водных дисперсий полимеров, как загуститель различных водных растворов и латексов, в качестве связующего при изготовлении литьевых форм для цветных и черных металлов, для изготовления водорастворимых пленок, консервирования донорской кожи и т. д. Специальные марки тщательно очищенного низкомолекулярного ПВС применяют в качестве плазмозаменителя при переливании крови, а также для изготовления лекарственного препарата «иодиол» (1%-ный водный

раствор ПВС применяют в качестве антисептика в медицине и ветеринарии).

Поливиниловый спирт или «PVA пластик» – уникальный расходный материал, существенно расширяющий возможности 3D-печати при использовании принтеров с двойным экструдером. PVA растворим в воде, что делает его совершенно непригодным для создания долговечных изделий, но позволяет использовать в качестве опорного материала при печати моделей сложной геометрической формы (рисунок 6.5).



Рис. 6.5. Гильбертов куб, напечатанный ABS-пластиком (серый) и PVA (белый)

Поддерживающие опоры из PVA пластика легко растворяются в теплой воде, оставляя прекрасную поверхность объекта и упрощая процесс удаления опор (обычно довольно утомительный). Температура печати приблизительно 170 °С и не должна превышать 200 °С.

6.8. HIPS – ударопрочный полистирол

Ударопрочный полистирол (УПС) – непрозрачный бесцветный материал, продукт привитой сополимеризации стирола с бутадиеновым или бутадиен-стирольным каучуком, имеющий двухфазную структуру.

Процесс сополимеризации с каучуком проводят в растворе стирола в присутствии пероксидных инициаторов и регуляторов. $M = 70 \div 100$ тыс. При этом одновременно проходят гомополимеризация стирола и привитая сополимеризация стирола с каучуком. Доля сополимера — около 15%.

Марочный ассортимент определяется способом получения и назначением ударопрочного ПС. При полимеризации в массе буквенное обозначение марки — УПМ, при суспензионной полимеризации — УПС, при механическом методе (компаундирование) — УПК. Марки

группируются по величине ударной прочности от сверхударопрочных (например, УПС-1104, УПМ-523) до марок с низкой ударной прочностью (например, УПК-675). За рубежом он имеет названия симак, дилен, люстрекс, амоко РН, стирекс, стокофлекс, стико (США), каринекс, дистрен, стиросел (Англия), стиромал (Германия). Выпускается стабилизированным в виде белых гранул. Первые две цифры четырехзначного номера марки и первая цифра трехзначного номера соответствуют минимальному значению ударной вязкости с надрезом в Дж/м', последняя цифра — удесятенное максимальное содержание остаточного мономера.

Этот материал можно считать композиционным, содержащим матрицу жесткого ПС ($M = 70 - 100$ тыс.), с частицами каучука размером $1-5$ мкм. окруженными тонким слоем привитого сополимера. Несмотря на низкую молекулярную массу полистирольной матрицы, благодаря присутствию каучука вязкость ударопрочного ПС близка по величине к вязкости ПС общего назначения ($ПТР = 1,5-15$ г/10 мин). Плотность — $1040-1070$ кг/м³).

Наличие эластичных частиц, химически связанных с жесткой матрицей, повышает ударную прочность и эластичность этого материала по сравнению с ПС. По химическим свойствам он близок к ПС. Ниже приведены некоторые характеристики ударопрочного ПС:

δ_p , МПа	30–35	T_m , °C	65–74
δ_H , МПа	55–60	T_B , °C	75–90
H_B , МПа	100–130	ρ_v , Ом·м	$10^{14}-10^{15}$
a , кДж/м ²	40–50	$tg \delta$ (при 10^6 Гц)	$(5 \div 7) \cdot 10^{-4}$
ε_p , %	20–30		

Непрерывная фаза (матрица) образована полистиролом. Дискретная фаза (микрогель) — частицами каучука овальной формы с размерами $2-5$ мкм. Каучуковые частицы окружены тонкой пленкой привитого сополимера стирола на каучуке, а внутри частиц содержится также окклюдированный полистирол, в результате чего увеличивается эффективный объем каучуковой фазы. От объема последней во многом зависят свойства ударопрочного полистирола. Ударопрочный полистирол выпускается стабилизированным, в виде белых гранул. Основные методы переработки — литье под давлением и экструзия листа с последующим пневмо- или вакуумформованием.

Условное обозначение ударопрочного полистирола в соответствии с ГОСТ 28250-89 состоит из букв УП — ударопрочный, сразу за которыми указывается метод синтеза полистирола: М — полимеризацией в массе, Э — полимеризацией в эмульсии, С — полимеризацией в суспензии. Далее через тире две цифры обозначают ударную вязкость. Следующие две цифры указывают удесятенное содержание остаточного мономера. Кроме того,

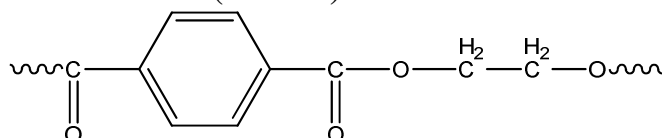
в марку может включаться буква, означающая предпочтительный способ переработки.

Пример условного обозначения ударопрочного полистирола, полученного полимеризацией в массе с ударной вязкостью 7 кДж/м² и остаточным содержанием мономера 0,3 %, предназначенного для переработки экструзионным методом: УПМ-0703 Э.

HIPS (ударопрочный полистирол) – пластмассовая нить, растворяющаяся в лимонене, иногда используется для создания поддерживающих структур (особенно для ABS), которые могут быть легко удалены без механического воздействия. Лимонен – это естественный растворитель, извлекаемый из корки лимонов и других цитрусовых. Температура печати HIPS приблизительно 230°C.

6.9. PET - полиэтилентерефталат

Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) — сложный полиэфир этиленгликоля и терефталевой кислоты (лавсан).



ПЭТФ получают из диметилтерефталата и этиленгликоля через реакцию переэтерификации с последующей поликонденсацией дигликольтерефталата в расплаве в присутствии катализатора (например, ацетата цинка) в токе азота. ПЭТФ выпускается в виде квадратных гранул в стабилизированном виде. За рубежом ПЭТФ имеет названия майлар, дакрон (США), мелинекс, терилен (Англия), хостафан (Германия), эстар, терфан (Франция), монтивел (Италия), лумиррор (Япония).

$M = 15 \div 40$ тыс., он имеет узкое молекулярно-массовое распределение – 1,2–1,6. Это жесткоцепной полимер с малой скоростью кристаллизации. При быстром охлаждении получается прозрачный ($K_{св} > 90\%$) аморфный полимер с температурой стеклования 80°C. При медленном охлаждении получают частично-кристаллические образцы сферолитной структуры со степенью кристалличности до 50% и температурой плавления 265°C. Плотность составляет 1380–1400 кг/м³. Температура деструкции 380°C.

ПЭТФ–слабополярный полимер с низким водопоглощением, однако, перед переработкой его необходимо сушить. Он растворяется при нагревании в фенолах, трифторуксусной кислоте, метиленхлориде, циклогексаноне. Нестоек к щелочам и концентрированным кислотам, бензо-и маслостоек; нетоксичен.

Закристаллизованный ПЭТФ является термопластом конструкционного назначения. Он обладает высокой прочностью (в том числе при

ударных нагрузках) и жесткостью в широком диапазоне температур. Его морозостойкость ниже -100°C . Прочность пленок значительно повышается при ориентационной вытяжке. Высокие диэлектрические характеристики позволяют использовать его для производства тонких конденсаторных пленок и деталей электротехнического назначения.

ПЭТФ — антифрикционный материал с высокой износостойкостью. Он стоек к действию УФ- и ионизирующих излучений, является самозатухающим материалом. Ниже приведены некоторые характеристики ПЭТФ:

δ_p , МПа	50–70	$T_B, ^{\circ}\text{C}$	235
δ_H , МПа	100–120	n_D^{20}	1,574
H_B , МПа	80–120	ρ_v , Ом·м	$10^{14}–10^{15}$
a , кДж/м ²	90	$\text{tg } \delta$ (при 10^6 Гц)	0,01–0,03
ε_p , %	80–130		

(здесь a — ударная вязкость, H_B — твердость по Бринеллю; T_B — теплостойкость по Вика).

ПЭТФ имеет малую вязкость расплава и хорошо перерабатывается литьем под давлением и экструзией (пленки). Используется для производства корпусных, электротехнических деталей.

Все больше широкое применение находит близкий по химической структуре и свойствам к ПЭТФ полибутилентерефталат (ПБТФ) — сложный эфир бутиленгликоля и терефталевой кислоты.

При меньшей кристалличности он имеет плотность $1270–1310 \text{ кг/м}^3$ и более низкую температуру плавления. Соответственно его теплостойкость и прочность ниже, чем у ПЭТФ ($T_B = 210 \div 218^{\circ}\text{C}$, $\delta_p = 35 \div 50 \text{ МПа}$), но он имеет меньшие значения технологической усадки, является хорошим антифрикционным материалом, его прозрачность достигает 90%. Наличие большей по длине алифатической части молекулы делает его более водостойким: водопоглощение менее 0,1%. Основным методом переработки ПБТФ является литье под давлением.

Прорыв ПЭТФ на мировой рынок произошел в 70-х гг. прошлого века. Материалы на основе полиэтилентерефталата (ПЭТФ) используются за рубежом для упаковки пищевых продуктов уже более 30 лет. Основным направлением использования ПЭТФ является применение полимера при изготовлении бутылочной тары, где он быстро вытесняет такой традиционный материал, как стекло. Бутылки из ПЭТФ занимают сегодня лидирующее положение среди упаковок для растительного масла, газированных напитков и питьевой воды, так как ПЭТФ обладает высокими барьерными свойствами к воздействию кислорода и углекислого

газа. Настоящий прорыв ПЭТФ совершил в 90-х гг., когда в бутылки из него начали разливать пиво.

РЕТ (полиэтилентерефталат) представляет собой бесцветную нить с очень высоким уровнем прозрачности. Материал легкий и ударопрочный. Предназначен для печати прозрачных моделей.

Для печати используются настройки аналогичные настройкам PLA:

- температура печати 210 - 220 °C;
- температура платформы 65 °C;
- скорость печати 20 - 40 мм/с;
- температура стеклования 60 °C;
- плотность 1,38 кг/дм³.

При 100 % заполнении модели достигается максимальная прозрачность.

6.10. Laybrick - «каменная» нить

Laybrick («каменная» нить) – это нить с эффектом песчаника для 3D печати каменных поверхностей, блоков замков и средневековых стен, имитации камней при создании ландшафтов и т.д. Материал laybrick в своем составе содержит натуральные минеральные материалы (например, мел) и сополиэфир. Может воспроизводить как гладкие, так и шероховатые поверхности. При температуре печати от 165 до 190 °C поверхность получается гладкая. При повышении температуры до 210 °C образуется шероховатая поверхность, приобретающая реалистичный эффект зернистости, присущий песчанику.

6.11. T-Glase - прочное стекло

T-glase (сокращение от toughglass – прочное стекло) – это низкотемпературный, высокопрочный индустриальный пластик. T-glase получен из самой сильной комбинации полимера PETT. В отличие от достаточно гибкого нейлона, t-glase довольно жесткий материал. Поставляется прозрачным, что является натуральным цветом этого типа полимеров.

Так же, как и PLA пластик, t-glase используется при более низких температурах. Диапазон температуры печати от 207 до 235 °C. Оптимальная температура печати 212 – 224 °C.

Обладает низкой усадкой при печати, что позволяет печатать большие объекты.

Готовые объекты из T-glase не токсичны, пластик пригоден для изготовления посуды.

T-glase может подвергаться вторичной переработке, хотя не является биоразлагаемым материалом, как PLA.

6.12. Поливинилхлорид (ПВХ) для 3D-печати

ПВХ – полимер винилхлорида.

Химическая формула: $[-\text{CH}_2-\text{CHCl}-]_n$.

Международное обозначение — PVC (от англ. *Polyvinyl chloride*).

ПВХ получают радикальной полимеризацией винилхлорида в присутствии пероксидных или азоинициаторов. В промышленных условиях полимеризацию осуществляют в основном в суспензии (в водной среде), а также в массе и в эмульсии.

Марочный состав определяется способом получения ПВХ, а также величиной средней молекулярной массы полимера, характеризуемой константой Фикентчера K_f , которая соответствует вязкости раствора полимера. Для промышленных марок константа Фикентчера изменяется от 50 до 80, при этом степень полимеризации и практически линейно растет от 450 до 1750:

$$n \approx 40(K_f - 40)$$

Марки ПВХ, полученного полимеризацией в суспензии, имеют буквенное обозначение ПВХ-С, в эмульсии — ПВХ-Е, в массе — ПВХ-М. Первые две цифры после буквенного обозначения указывают на минимальную величину K_f . Буквы после цифр определяют возможное применение ПВХ данной марки. Так, буква М — ПВХ для мягких изделий, Ж — для жестких изделий, П — для паст. Например, ПВХ-С 7058 М — это суспензионный ПВХ с $K_f \geq 70$ (средняя степень полимеризации – 1200), рекомендуемый для изготовления мягких изделий.

ПВХ выпускается в виде порошка с размером частиц 100–200 мкм.

ПВХ характеризуется очень широким молекулярно-массовым распределением. Степень полимеризации для различных фракций полимера одной и той же марки может изменяться в несколько десятков раз. Разветвленность макромолекул составляет 2–5 на 1000 атомов углерода основной цепи и зависит от способа получения полимера.

ПВХ – аморфный полимер (степень кристалличности не превышает 10%) плотностью 1380 – 1400 кг/м³ и с температурой стеклования 70–80° С. Это один из наиболее полярных полимеров с высоким межмолекулярным взаимодействием. При нагревании он растворяется в хлорированных углеводородах, кетонах, циклогексаноне, тетрагидрофуране: масло-, бензо- и водостоек, стоек к действию кислот и щелочей. Он хорошо совмещается с большинством выпускаемых промышленностью пластификаторов.

При нагревании до температур более 150–170° С при переходе в вязкотекучее состояние ПВХ начинает разлагаться с выделением большого количества тепла и хлороводорода с образованием сопряженных двойных

связей. Это вызывает уже на начальных стадиях деструкции (до заметного изменения физико–механических характеристик) потемнение полимера. Выделяющийся хлороводород ускоряет процесс разложения, что делает невозможной переработку ПВХ обычными методами, без термостабилизации.

Большое содержание хлора в ПВХ делает его самозатухающим материалом. ПВХ – это полимер общетехнического назначения. На практике имеют дело с винипластами, пластикатами и пластизолями ПВХ.

Хотя большинство материалов, используемых в 3D-печати, заимствуются из ассортимента уже существующих промышленных полимеров, поливинилхлорид не находил применения в аддитивном производстве.

Из поливинилхлорида выпускают большой ассортимент продукции: пластиковые трубы, заменители кожи, защитные пленки на моющихся обоях и натяжных потолках, грампластинки и т.п. Поливинилхлорид обладает массой заманчивых свойств: он прочен, дешев, устойчив к воздействию внешней среды и даже огня. Благодаря этому ПВХ занимает третье место среди термопластов по объему промышленного использования. Почему же ПВХ не нашел своего места в 3D-печати?

Все дело в токсичности. Хотя в стабильном виде этот пластик не представляет опасности, при сгорании он выделяет букет токсичных и канцерогенных хлорорганических соединений, включая фосген (газ удушающего действия, использовавшийся в качестве химического оружия в Первую мировую войну) и диоксины (вызывают нарушения обменных процессов в организме человека), что усложняет утилизацию. Кроме того, в промышленный ПВХ зачастую добавляются свинец (в качестве стабилизатора) и фталаты (в качестве пластификаторов). Последние накапливаются в готовом продукте и в течение некоторого времени выделяются в газообразной форме. Токсичные вещества, входящие в состав термопластов применяются и в других видах полимеров. Например, ABS (акрилонитрилбутадиенстирол), символ «S» в обозначении полимера означает стирол – химическое вещество, поражающее нервную систему человека. То же самое касается и полистирола (HIPS). Поликарбонат может стать источником канцерогенного бисфенола А: это вещество используется в качестве отвердителя, а в готовых изделиях может присутствовать в относительно небольших остаточных объемах, выделяясь при нагревании. Именно поэтому и не рекомендуется использовать поликарбонат для изготовления контейнеров для горячей еды или напитков.

Хотя концентрации вредных веществ в воздухе при 3D печати в большинстве случаев достаточно малы, многие из них имеют кумулятивный эффект, накапливаясь в организме. Потому помещения, в которых производят 3D печать, должны оснащаться хорошей вентиляцией.

Относительно безопасными полимерами, используемыми для 3D печати, являются полилактид и поликапролактон.

Представители австралийской компании Chemson Pacific уверяют, что им удалось создать безопасную версию ПВХ для 3D печати, получившую название «3DVinyl». Разработка материала велась на протяжении двух лет с участием экспертов из DuPont, PMMCO и AIO Robotics. Как заявляют создатели, готовый продукт перенял стойкость к химическому воздействию и высокую температуру воспламенения промышленных аналогов. Кроме того, компания заявляет об относительно экологичном производственном процессе, использующем природный газ вместо сырой нефти, а готовый материал прочен, обладает хорошей текучестью во время экструзии и низкой усадкой.

Коммерциализация поливинилхлорида в качестве филамента начнется в Австралии, где компания заключает альянсы с местными производителями Welvic и CSIRO, работающими на австралийский, новозеландский и азиатский рынок. В Европе и США компания будет представлена американским производителем филаментов Functionalize, известном своими токопроводящими композитами. Опытные образцы уже были испытаны на 3D-принтерах Zeus производства AIO Robotics.

Что касается характеристик нового филамента, генеральный директор Functionalize Майкл Тутонги заявил: «3DVinyl не содержит свинец или фталаты. Это пластик, аналогичный тому, что используется в пакетах для переливания крови. В то же время, Chemson добавила пластификаторы и стабилизаторы с тем, чтобы превратить ПВХ в приемлемый для 3D-печати термопластик, заодно упразднив образование хлорорганических соединений. В результате был получен материал, не выделяющий неприятных запахов и не требующий высокой температуры экструзии или подогрева платформы, как АБС. Материал обладает хорошими эстетическими и технологическими качествами для 3D печати, а стабилизация химической композиции основана на новых методах, разработанных в Clemson. Ведутся работы над созданием готового коммерческого продукта».

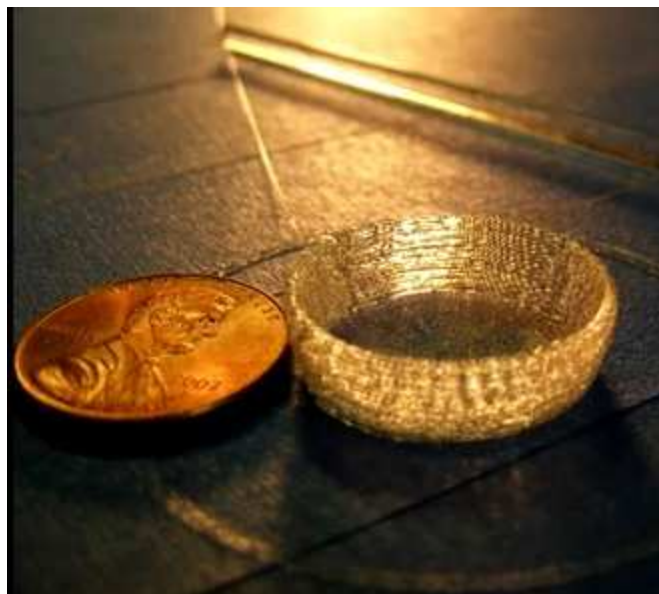
6.13. Акрил

АКРИЛ, тип пластмассы (из группы синтетических производных одной из ненасыщенных ОРГАНИЧЕСКИХ КИСЛОТ) с короткой цепочкой.

Изменяя реагенты и методы формовки, можно получить продукт либо твердый и прозрачный, либо мягкий и упругий, либо жидкий. Прозрачность, прочность и стабильность размеров получаемых изделий делают акрилы полезными для изготовления деталей способом литья в формах, линз, клеев и красок.

Акрил — обиходное определение для группы синтетических материалов на основе производных акриловой и метакриловой кислот и полимерных композиций из них.

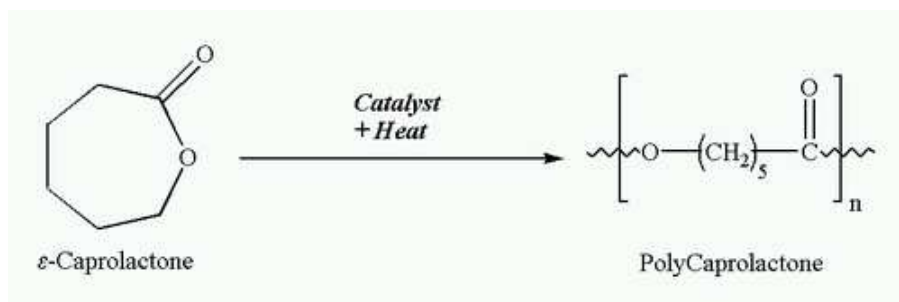
Акрил используется в 3D печати для создания прозрачных моделей. При использовании акрила необходимо учитывать следующие особенности: для данного материала нужна более высокая температура плавления, чем для ABS-пластика, и он очень быстро остывает и твердеет. В разогретом акриле появляется множество мелких воздушных пузырьков, которые могут вызвать визуальные искажения готового изделия.



Изделия, напечатанные из акрила

6.14.Поликапролактон (PCL)

Синтезируется из ϵ -капролактона при нагреве и использовании катализаторов:



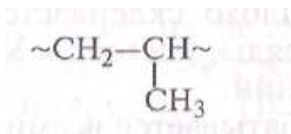
Поликапролактон близок по свойствам к биоразлагаемым полиэфирам. Это один из самых популярных расходных материалов для 3D печати. Он имеет низкую температуру плавления, быстро затвердевает, обеспечивает прекрасные механические свойства готовых изделий, легко разлагается в человеческом организме и безвреден для человека. Кроме того, он может применяться сразу в нескольких технологиях 3D печати: SLS, ZCorp и FDM.



Поликапролактон для 3D принтера

6.15. Полипропилен (PP)

Полипропилен (ПП) — полимер пропилена.



Полипропилен — наиболее легкий из всех известных жестких полимеров, отличающийся высокой прочностью на разрыв и твердостью. Благодаря своей кристаллической структуре ПП сохраняет форму и механические свойства вплоть до температуры плавления и может подвергаться обычной стерилизации. По прочности ПП превосходит ПЭ, однако уступает по морозостойкости.

Изотактический ПП получают полимеризацией в растворителях в присутствии катализаторов типа Циглера – Натта.

Марочный ассортимент определяется способом получения и показателем текучести расплава полимера (от 0,3 до 23 г/10 мин). В названиях базовых марок содержится пять цифр. Две первые цифры определяют способ получения ПП, три последние цифры соответствуют удельному значению ПТР. Так, ПП 21090 имеет ПТР, равный 9 г/10 мин. Выпускается в виде гранул, отмытым от катализаторов и атактической

фракции и стабилизированным. Нестабилизированный порошкообразный ПП имеет буквенное обозначение марок (А, Б и В).

За рубежом ПП имеет названия профакс, поли-про, олеформ (США), моiplен (Италия), гостален (Германия), пропатен (Англия), данлай, донбанд (Япония).

Промышленно выпускаемый ПП имеет линейную регулярную структуру макромолекул. $A=60\div 200$ тыс. Способен кристаллизоваться. Вследствие пониженной скорости кристаллизации размер сферолитов, а следовательно, и комплекс физико-механических свойств зависят от режима охлаждения изделий (мелкосферолитная структура более желательна).

Степень кристалличности достигает 73–75%), при этом плотность ПП составляет $900\text{--}910\text{ кг/м}^3$, а температура плавления – $165\text{--}170^\circ\text{C}$.

ПП является неполярным полимером. Растворяется при повышенных температурах в ароматических и гидроароматических, а также хлорированных углеводородах, маслостоек, стоек к кислотам и щелочам.

Наличие третичного углерода в молекулярной цепи делает его менее стойким к термоокислительной деструкции ($T_{\text{дестр}} \geq 300^\circ\text{C}$) и действию ионизирующих излучений.

ПП относится к полимерам общетехнического назначения. Он обладает высокой химической и водостойкостью, имеет хорошие электроизоляционные характеристики. Имеются марки, допущенные к контакту с пищевыми продуктами. Ниже приведены некоторые характеристики ПП:

δ_p , МПа	30–35	T_B , $^\circ\text{C}$	140–155
H_B , МПа	40–70	T_M , $^\circ\text{C}$	85–100
a , кДж/м ²	80	ρ_v , Ом·м	$10^{15}\text{--}10^{16}$
ε_p , %	400–800	$\text{tg } \delta$ (при 10^6 Гц)	$(3\div 5) \cdot 10^{-4}$

(здесь a – ударная вязкость, H_B — твердость по Бринеллю; T_B – теплостойкость по Вика, T_M – теплостойкость по Мартенсу).

К недостаткам ПП следует отнести низкую морозостойкость (-15°C); он горюч, плохо склеивается, способен накапливать электростатические заряды.

ПП хорошо перерабатывается всеми основными методами переработки термопластов. Он используется в медицине, пищевой промышленности, в электротехнике (в том числе в виде ориентированных конденсаторных пленок) и так далее. При его переработке следует учитывать возможность ухудшения механических свойств при неправильном выборе режима охлаждения изделий.

Полипропилен – это самая лёгкая из всех ныне существующих пластических масс. По сравнению с полиэтиленом низкого давления хуже плавится и лучше противостоит истиранию. При этом уязвим к активному кислороду и деформируется при отрицательных температурах.



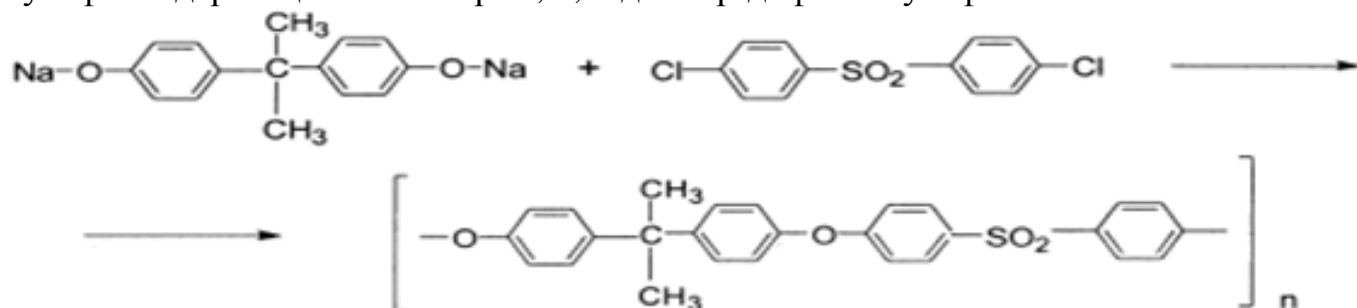
Полипропилен для 3D печати

6.16. Полифенилсульфон (PPSU)

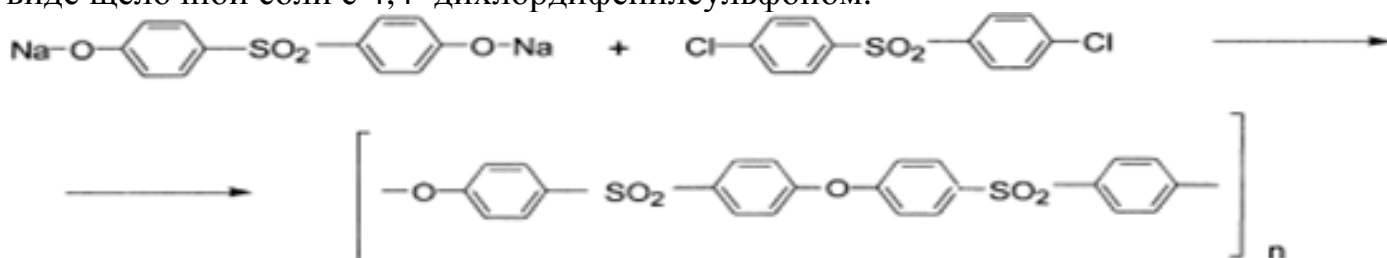
Полифенилсульфон (PPSF или PPSU) является одним из видов формовочной пластика. Полифенилсульфон является тепло- и химически стойким материалом. Он используется в автомобильной и аэрокосмической промышленности. Полифенилсульфон практически не имеет температуры плавления, благодаря своей аморфной природе, и предполагает прочность на разрыв до 8000 фунтов на квадратный дюйм (или 551,58 Бар). Его коммерческое название является RadelR. Обладая деформационной теплостойкостью 207°C, материал может работать в условиях высокой температуры и при этом выдерживать ударные нагрузки. Полимер обладает природной негорючестью и великолепной химической стойкостью.

Получение. Синтез ароматических полисульфонов осуществляется методом ароматической нуклеофильной поликонденсации в апротонных растворителях. В качестве растворителей, как правило, используют диметилсульфоксид, диметилацетамид, N-метилпирролидон, диметилсульфон, дифенилсульфон. Для получения щелочных солей бисфенолов применяют гидроокись натрия или углекислый калий.

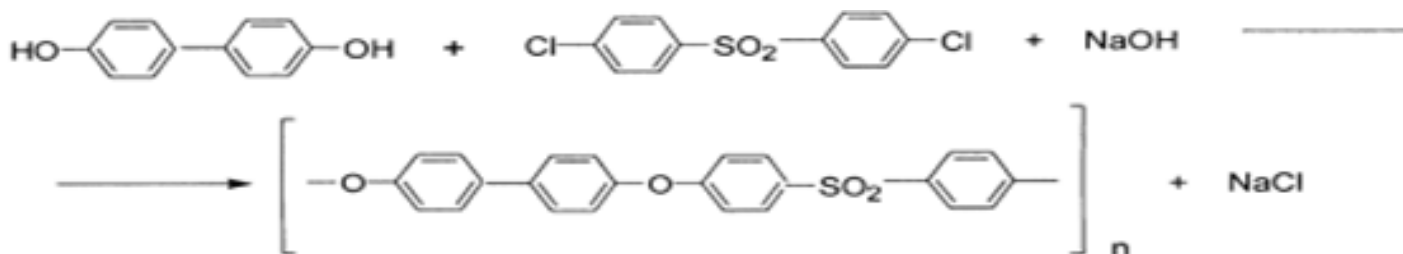
Поликонденсацию ведут при температуре 160 – 3200С в зависимости от применяемого растворителя и реакционной способности мономеров. Полисульфон получают взаимодействием щелочной соли бисфенола-А с сульфонсодержащим мономером, 4,4'-дихлор-дифенилсульфоном:



Полиэфирсульфон получают реакцией 4,4'-диоксидифенил-сульфона в виде щелочной соли с 4,4'-дихлордифенилсульфоном:



Полифенилсульфон получают реакцией 4,4'-диоксидифенила и 4,4'-дихлордифенилсульфона:



<https://research-journal.org/chemistry/polisulfon-kak-funkcionalnyj-polimernyj-material-i-ego-proizvodstvo/>

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАТЕРИАЛА

- Температура отклонения под нагрузкой 207°С
- Непревзойденная ударная прочность
- Великолепная гидролитическая стабильность
- Великолепная химстойкость

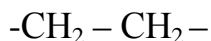
Данный материал пришёл в 3D печать из авиапромышленности. Он практически не горит, характеризуется теплостойкостью, высокой

твёрдостью. Напоминает обычное стекло, но превосходит его по прочности. Используется в технологиях 3D печати: SLS и FDM.

6.17. Полиэтилен низкого давления (HDPE)

Это самый распространённый вид пластмассы в мире, из которого изготавливают ПЭТ-бутылки, канистры, трубы, плёнки, пакеты и т.д. В 3D печати полиэтилен низкого давления является непревзойдённым лидером (рис. 6.17). Данный материал может быть использован в любой технологии 3D печати [28].

Полиэтилен (ПЭ) – полимер этилена:



В зависимости от условий полимеризации получают марки ПЭ, различающиеся по разветвленности и содержанию сомомера, вводимого для регулирования степени кристалличности.

Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) получают радикальной полимеризацией в присутствии кислорода и инициаторов (пероксидных соединений) при температурах 200—300° С и давлениях 100—350 МПа.

Марочный состав определяется способом получения, плотностью (от 910 до 935 кг/м³) и показателем текучести расплава ПТР (от 0,3 до 20 г/10 мин).

В названиях базовых марок содержится восемь цифр. Четыре первые цифры указывают на способ получения, пятая соответствует группе плотности, три последние через дефис – удесятенному значению среднего показателя текучести расплава полимера. Так, например, марка ПЭ 15803—020 принадлежит ПЭНП (до 930 кг/м³), имеющему показатель текучести расплава 2 г/10 мин. В обозначении композиций сохраняются лишь три первые цифры базовой марки. ПЭНП выпускается стабилизированным в виде гранул, реже — в виде порошка.

За рубежом ПЭНП имеет названия: петротен (США), алкатен (Англия), хостален LD (Германия), стафлен (Япония), лотрен (Франция), фертен (Италия).

Комплекс свойств ПЭНП, полученного радикальной полимеризацией, определяется разветвленной структурой его макромолекул – 15-25 ответвлений на 1000 атомов углерода цепи. Молекулярная масса $M = 30 \div 500$ тыс.

ПЭНП способен кристаллизоваться. Наличие разветвлений ограничивает степень кристалличности (менее 60%). Температура плавления

составляет 108-110°С. Высокая скорость кристаллизации делает величину степени кристалличности и, следовательно, свойства ПЭ мало зависящими от режима охлаждения. Температура деструкции — 320° С.

ПЭ является неполярным полимером. При нормальных условиях вследствие кристалличности он не растворяется в известных органических растворителях; при нагревании выше 80° С растворяется в алифатических и ароматических растворителях и их галогенопроизводных. Стоек к кислотам и щелочам, нестойк к сильным окислителям.

ПЭНП относят к термопластам общетехнического назначения. Он отличается сравнительной дешевизной и технологичностью, морозостоек, сохраняет эластичность до -70° С, обладает высокой химической стойкостью, что позволяет использовать его в изготовлении тары для агрессивных жидкостей: имеет малое водопоглощение. ПЭ инертен к физиологическим средам и пищевым продуктам, кроме жиров. Он является прекрасным электроизоляционным материалом и используется для низко- и высокочастотной изоляции.

ПЭНП радиационностоек, может сшиваться при воздействии ионизирующих излучений, имеет низкую газопроницаемость. Ниже приведены некоторые характеристики ПЭНП:

δ_p , МПа	12–16	T_M , °С	50
ϵ_p , %	150-600	ρ_v , Ом·м	10^{16}
T_B , °С	80-100	$tg\delta$ (при 10^6 Гц)	$(2 \div 2,5) \cdot 10^4$

(здесь a — ударная вязкость, H_B — твердость по Бринеллю; T_B — теплостойкость по Вика, T_M — теплостойкость по Мартенсу).

К недостаткам этого полимера следует отнести низкие предельные температуры эксплуатации (невозможность стерилизации), низкие прочностные характеристики и твердость, горючесть, способность накопления электростатических зарядов.

ПЭНП перерабатывается всеми основными методами переработки термопластов, не склеивается без специальной обработки поверхности. Низкая стоимость позволяет использовать его для изготовления тары и изделий культурно-бытового и медицинского назначения. Более половины производимого ПЭНП перерабатывается в пленки для упаковки и нужд сельского хозяйства.

Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) получают полимеризацией на катализаторах типа Циглера–Натта, протекающей по ионно-координационному механизму при температуре 80° С и давлении 0,3–0,5 МПа.

Обозначение марок ПЭВП аналогично обозначению марок ПЭНП, но начинается с цифры «2». Плотность изменяется от 945 до 955 кг/м³, а ПТР

– от 0,1 до 17 г/10 мин.

Выпускается стабилизированным в виде гранул или порошка.

За рубежом ПЭВП имеет названия бакелит (США), карлон (Англия), хостален G (Германия), хей-жекс (Япония), манолен (Франция), монлен (Италия).

Способ полимеризации обуславливает малую разветвленность ПЭВП (количество ответвлений на 1000 атомов углерода составляет 3–6). $M = 50 \div 3500$ тыс., однако, обычно значение M не превышает 800 тыс. При $M > 2$ млн. ПЭ хотя и имеет хороший комплекс свойств, но практически теряет текучесть (высокомолекулярный полиэтилен). Предел прочности при растяжении превышает 40 МПа.

Низкая разветвленность приводит к высокой степени кристалличности, которая составляет 70–80%, а температура плавления – 120–125° С. ПЭВП обладает большей стойкостью к растворителям, чем ПЭНП, растворяется при повышенной температуре в алифатических и ароматических растворителях и их галогенопроизводных. Стоек к кислотам и щелочам, нестойк к сильным окислителям.

Вследствие более высокой степени кристалличности ПЭВП имеет более высокие прочностные показатели: теплостойкость, жесткость и твердость. Он имеет высокую морозостойкость, химическую и радиационную стойкость. Наличие остатков катализаторов не позволяет использовать его в контакте с пищевыми продуктами (требуется отмывка от катализаторов). Несколько хуже, чем у ПЭНП (из-за остатков катализаторов), высокочастотные электрические характеристики, однако это не ограничивает применения ПЭВП в качестве электроизоляционного материала. Ниже приведены некоторые характеристики ПЭВП:

δ_p , МПа	22–30	T_M , °С	100
δ_H , МПа	20–35	ρ_v , Ом·м	10^{16}
ε_p , %	300–800	$tg\delta$ (при 10^6 Гц)	$(2 \div 5) \cdot 10^{-4}$
T_B , °С	110–120		

(здесь H_B — твердость по Бринеллю; T_B – теплостойкость по Вика, T_M – теплостойкость по Мартенсу).

ПЭВП перерабатывается в изделия всеми основными методами, наиболее часто – литьем под давлением. Хорошо сваривается. Он используется для изготовления тары, листов, труб, ориентированных лент и различных изделий технического назначения.

Полиэтилен среднего давления (высокой плотности) – ПЭСД – получают полимеризацией в растворителе в присутствии оксидов Co, Mo, V при 130–170°С и давлении 3,5–4 МПа.

Разветвленность ПЭСД менее 3 на 1000 атомов углерода основной цепи. $M = 70 \div 400$ тыс. Линейный ПЭСД имеет еще большие значения плотности (от 950 до 976 кг/м³) и высокую температуру плавления (от 128 до 132°C), ПТР — от 0,3 до 20 г/10 мин. Обозначение марок — как у ПЭВП.

По большинству эксплуатационных и технологических свойств он близок к ПЭВП, однако большая упорядоченность надмолекулярной структуры делает его более прочным, жестким и теплостойким. Вот его некоторые характеристики:

δ_p , МПа	20–40	ρ_v , Ом·м	10^{16}
ε_p , %	200–1000	$\operatorname{tg} \delta$ (при 10^6 Гц)	$(2 \div 4) \cdot 10^{-4}$

При сополимеризации этилена с небольшими количествами α -олефинов — пропилена, бутилена и других (0,2–3% мол.) — можно получать линейные полиэтилены средней (930 ÷ 940 кг/м³) и низкой (менее 930 кг/м³) плотности (ПЭСП и ЛПЭНП). Эти модификации ПЭ в настоящее время получают все более широкое применение, так как совмещают положительные качества ПЭНП и ПЭВП. Так, пленка из ЛПЭНП, сохраняя эластичность, характерную для пленок из ПЭНП, имеет большую прозрачность. Экструзионные пленки, изготовленные из ПЭСП, по внешнему виду подобны бумаге (шероховатость, мутность), а прочностные характеристики их такие же, как у пленок из ПЭВП, однако они более эластичны.



Рис. 6.17. Полиэтиленовая обувь, напечатанная на 3D принтере

6.18. Некоторые другие материалы

Существуют 3D принтеры, которые предназначены для печати глиняными смесями, известковым порошком, продуктами питания, живыми органическими клетками и многими другими удивительными материалами. О том, какие материалы для 3D печати будут использоваться в ближайшем будущем, остаётся лишь догадываться. Многие из этих материалов могут сочетаться с полимерными материалами при 3Д печати.

Бетон

В настоящее время изготовлены пробные образцы [3D принтеров для печати бетоном](#). Это огромные печатающие устройства, которые кропотливо, слой за слоем, «печатают» из бетона строительные детали и

конструкции (рис. 6.18.1). Такой **3D принтер** может всего лишь за 20 часов «напечатать» жилой двухэтажный дом общей площадью 230 м².

Для 3D печати используется усовершенствованный сорт бетона, формула которого на 95% совпадает с формулой обычного бетона.



Рис. 6.18.1. Изделия, напечатанные бетоном

Гидрогель

Учёные из иллинойского Университета (США) напечатали при помощи 3D принтера и гидрогеля биороботов длиной 5-10 мм. На поверхность биороботов поместили клетки сердечной ткани, которые распространились по гидрогелю и начали сокращаться, приводя в движение робота. Такие роботы из гидрогеля способны передвигаться со скоростью 236 микрометров в секунду. В будущем они будут запускаться в организм человека для обнаружения и нейтрализации опухолей и токсинов, а также для транспортировки лекарственных препаратов к месту назначения.

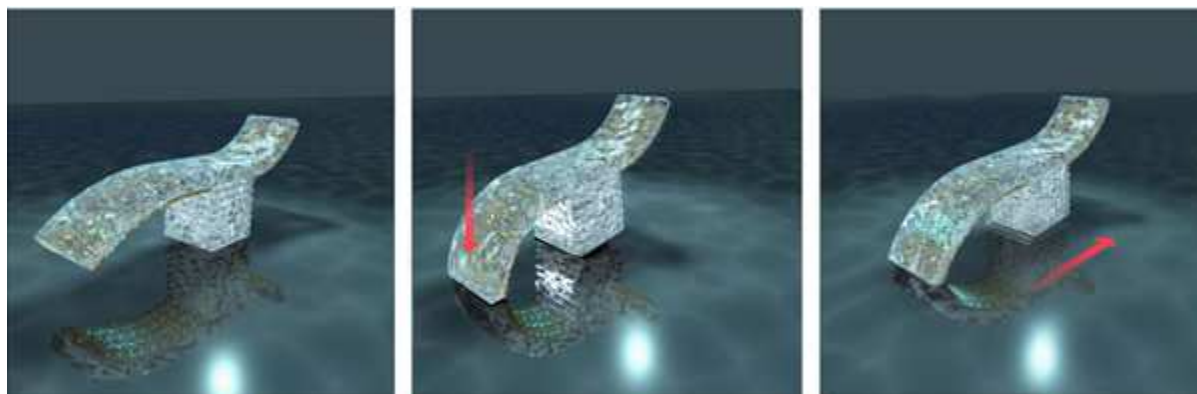


Рис. 6.18.2. Биороботы из гидрогеля, напечатанные 3D принтером

Бумага

В некоторых 3D принтерах в качестве материала для печати используется обычная бумага формата А4. Так как бумага – это доступный и недорогой материал, то и бумажные модели получаются недорогими и доступными для пользователей (рис. 6.18.3). Такие модели печатаются послойно, причём каждый последующий слой бумаги вырезается принтером и наклеивается на предыдущий. Модели из бумаги печатаются быстро, но не могут похвастаться прочностью или эстетичностью. Они идеально подойдут для быстрого прототипирования компьютерного проекта.



Рис. 6.18.3. 3D модели, напечатанные из бумаги

Гипс

В современной 3D печати широко применяются гипсовые материалы. Модели, изготовленные из гипса, недолговечны, но имеют очень низкую себестоимость (рис. 6.18.4). Такие модели идеально подходят для изготовления объектов, предназначенных для презентаций. Их можно показывать в качестве образца заказчикам и клиентам, они отлично передадут форму, структуру и размер оригинального изделия. Так

как гипсовые модели отличаются высокой термостойкостью, их используют в качестве образцов для литья.



Рис. 6.18.4. 3D модель, напечатанная из гипса

Лёд

В 2006 году два канадских профессора получили грант на развитие технологии 3D печати ледяных фигур (рис. 6.18.5). За три года они научились создавать при помощи 3D принтеров небольшие ледяные предметы. Печать протекает при температуре -22°C , в качестве расходных материалов используются вода и метиловый эфир, подогретый до температуры 20°C .



Рис. 6.18.5. Фигура, напечатанная льдом

Металлический порошок

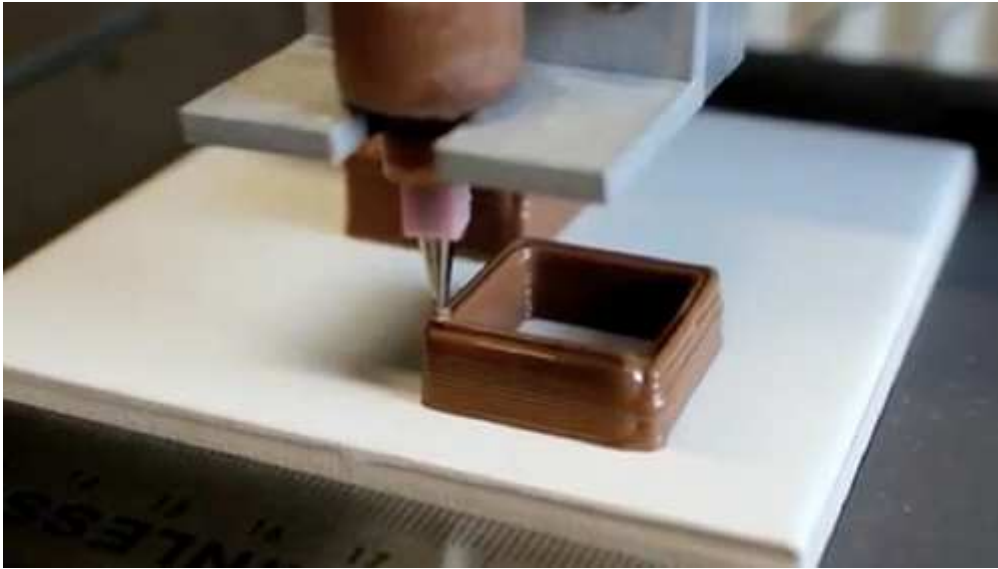
Ни один пластик не сможет заменить металл с его приятным мягким блеском и высокой прочностью. Поэтому в 3D печати очень часто используется порошок из лёгких и драгоценных металлов: меди, алюминия, их сплавов, а также золота и серебра. Однако металлические модели не обладают достаточной химической стойкостью и имеют высокую теплопроводность, поэтому в металлический порошок для печати добавляют стекловолоконные и керамические вкрапления (рис. 6.18.6).



Рис. 6.18.6. Украшения из металлического порошка, напечатанные 3D принтером

Шоколад

Британские учёные представили публике первый шоколадный 3D принтер, который печатает любые шоколадные фигурки, заказанные оператором (рис. 6.18.7). Принтер наносит каждый следующий слой шоколада поверх предыдущего. Благодаря способности шоколада быстро застывать и твердеть при охлаждении, процесс печати протекает довольно быстро. В ближайшем будущем такие принтеры будут востребованы в кондитерских и ресторанах.



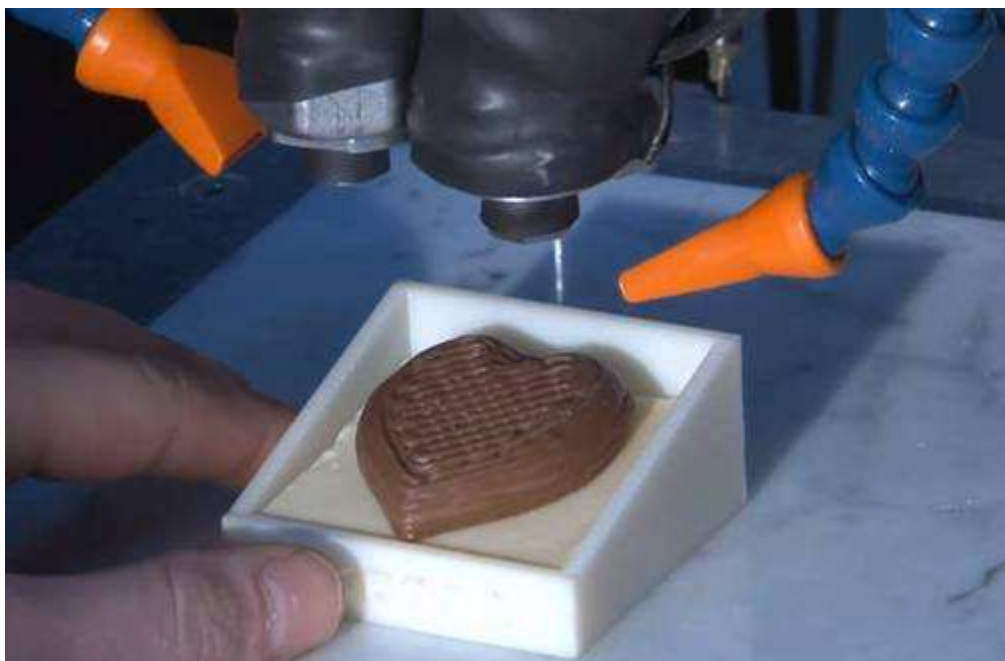


Рис. 6.18.7. Шоколадный принтер в работе

Экспериментальные филаменты

Изобретатель Кай Парти (KaiParthy) создает экспериментальные филаменты для 3D-печати, которые обладают уникальными свойствами.

Серия Poro-LAY включает четыре вида филамента, которые отличаются строением и размерами пор в их структуре, а также возможностями применения.

Lay-Felt содержит мягкие волокна, похожие на фетр. Этот филамент подходит для 3D-печати мембран, фильтров, одежды и искусственной бумаги.

Lay-Tekkks содержит более тонкие и мягкие волокна, которые позволяют применять филамент для создания ориентированной структуры, а также для создания одежды и материалов.

Lay-Fomm содержит большое количество пор, которые делают этот материал похожим на мягкую резину. Он идеален для создания губок, эластичных костюмов и биоклеток.

Gel-Lay – это высокопористый материал, изделия из которого крайне нестабильны. Этот филамент применим для 3D-печати объектов для работы в воде и биомеханических структур.

Кай Парти рассказал о возможностях применения своих экспериментальных пористых филаментов:

После вымывания полимера, Poro-LAY становится пористым материалом, по структуре похожим на человеческие мышцы. Филамент может проводить ток, если заполнить его поры электролитом, таким

как соленая вода или ионная жидкость. В таких условиях Poro-LAY проводит низковольтные сигналы как медная проволока. Материал можно применять в качестве мембран в электрохимических элементах, а также в робототехнике.

Парти надеется, что Poro-LAY найдет применение в конструкции разборных солнечных батарей или вибрационных демпферах, во всех устройствах, которые понадобятся для освоения Марса в ближайшие 20 лет. Полимер в составе Poro-LAY можно заменить биологически совместимыми компонентами, которые позволят бактериям разлагать материал после его применения.

Существуют 3D принтеры, которые предназначены для печати глиняными смесями, известковым порошком, продуктами питания, живыми органическими клетками и многими другими удивительными материалами. О том, какие материалы для 3D печати будут использоваться в ближайшем будущем, остаётся лишь догадываться.

6.19. Получение полимерных материалов с заданной структурой методами аддитивных технологий

Появление 3D принтеров открывает принципиально новые возможности в компьютерном дизайне полимерных материалов. Появилась возможность непосредственно реализовать различные структуры в полимерных материалах посредством 3D печати [25-27]. В Волжском политехническом институте (филиале) ВолгГТУ спроектированы 3D модели и напечатаны на изготовленных в институте 3D-принтерах на основе различных полимеров материалы со сложной микроструктурой. На рис. 6.19.1, 6.19.2 и 6.19.3 приведены некоторые примеры прототипирования микропористых и самоармированных полимерных материалов. Необходимо отметить, что можно получить чрезвычайно большое разнообразие макро- и микрогетерогенных структур с элементами практически любой формы. В настоящее время изучаются механические и физико-химические свойства таких материалов, в том числе, в экстремальных условиях эксплуатации. Кроме того, ведется изготовление методом 3D-печати изделий сложной геометрической формы с диаметром до 800мм и толщиной до 40мм. Метод позволяет отказаться от изготовления чрезвычайно дорогостоящих металлических прессформ и добиться существенного снижения материалоемкости изделия за счет создания силовых гетероструктур в изделии.

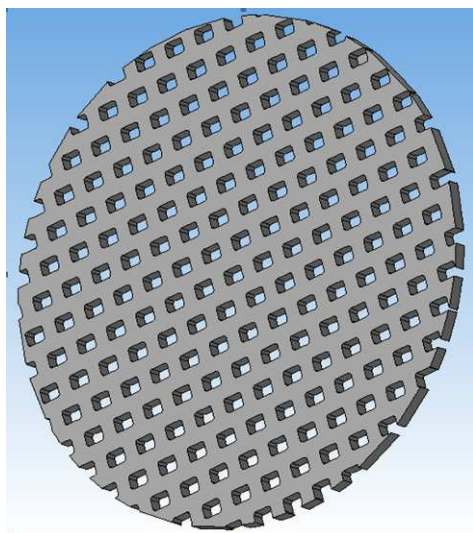


Рис. 6.19.1. Материал из АБС-пластика с прямоугольными микропорами (3D-модель).
Характеристики образца: - диаметр диска 10 мм; - толщина диска 0,3 мм; - размер
ячейки 0,3 x 0,4 мм; толщина стенки между ячейками 0,3 мм.

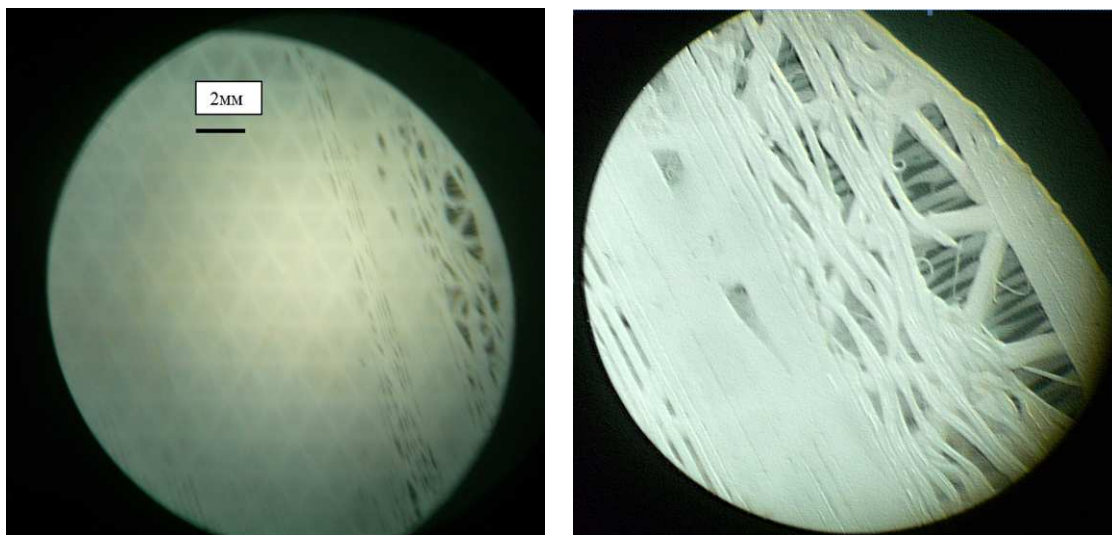


Рис. 6.19.2. Материал из АБС- пластика с самоармированием - полигональные и
волокнистые структуры (напечатано на 3D-принтере ВПИ «3DLife»)



а)



б)

Рис. 6.19.3. Образцы из АБС- пластика с заданной структурой материала самоармированием (полигональные и пористые структуры (напечатано на 3D-принтере ВПИ «3DLife»). а) - двусторонняя «лопатка» для механических испытаний; б) диск с заданной пористой структурой

7. Особенности подготовки модели к FDM печати (автор Бойцов Е. П.)

Рассмотрев основные виды материалов, следует приступить к особенностям подготовки модели к печати.

Прежде чем приступать к основам подготовки модели, необходимо дать несколько определений.

Слайсер (Slicer) – программное обеспечение, необходимое для перевода цифровой 3D модели в управляющий код для 3D принтера (G-code). Формат файла трехмерной модели в основном .stl либо .obj.

Слайсеров существует довольно много, самые распространенные это CraftWare, Kisslicer, Slic3r, Skineforge, Cura и др., каждый из них имеет свои особенности. В слайсере выставляются все настройки необходимые для печати – температуры печати, размеры, слои, размер экструзии, заполнение и др.

Модель обрабатывается в программе по слоям. Каждый слой состоит из периметра или заливки (рис. 7.1). Модель может иметь разный процент заполнения заливкой, также заливки может и не быть (пустотелая модель с различной толщиной стенок). Все параметры задаются программно.

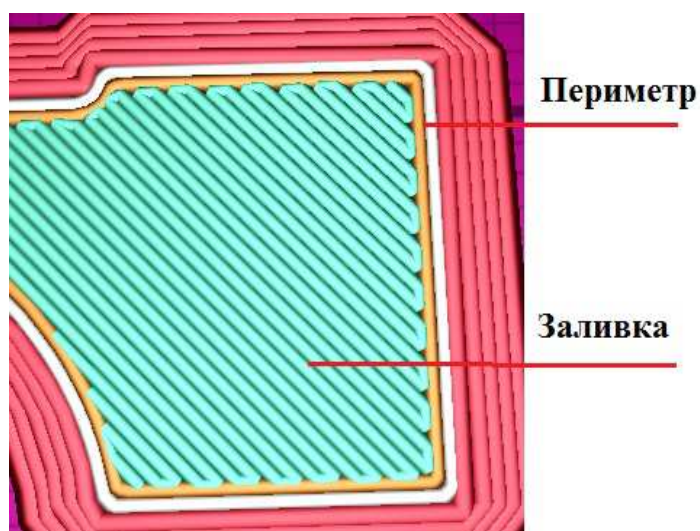


Рис. 7.1. Периметр и заливка модели

Процентное соотношение заливки модели представлено на рисунке 7.2.

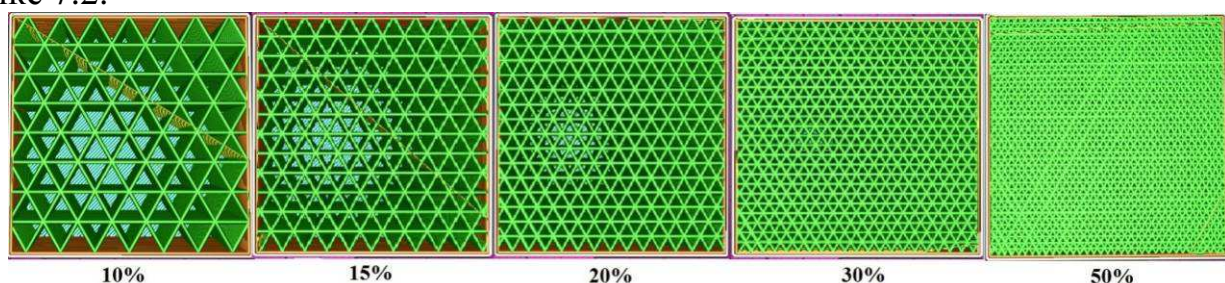


Рис. 7.2. Процентное заполнение модели при размере отверстия сопла 0,42 мм (Слайсер CraftWare)

При печати из ABS пластика необходимо плоское основание у модели для хорошей адгезии (прилипания) первых слоев, чтобы в дальнейшем модель была устойчива и не отлипала от поверхности платформы. Если деталь имеет не плоское основание, то деталь дополнительно устанавливают на подложку из пластика, так называемый raft (рис. 7.3).

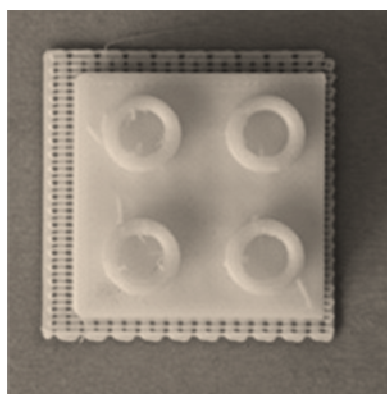


Рис. 7.3. Raft для модели

Рафт (raft) — подложка, конструкция, которая строится под моделью. Она не однородная, строится в виде сеточки. Рафт исправляет незначительные неровности платформы и обеспечивает прочное сцепление первого слоя модели с платформой. Рафт после печати требует удаления с помощью механической обработки. Это портит основание модели.

Также для устранения отлипания детали делают дополнительное основание – brim (указан красным цветом на рисунке 7.1).

Брим (brim) — кайма вокруг модели, состоящая из дополнительных первых слоев. Бриму добен для лучшей адгезии в случае отклеивания краев или их деформации. Кроме этого, очень полезная вещь, если основание у модели очень маленькое, неустойчивое. После печати брим обрезается. В отличие от рафта, брим не деформирует первый слой модели.

Для печати из PLA пластика brim и raft не нужны.

Есть еще одна полезная функция в слайсере, которая используется для удобства печати - Skirt.

Skirt (скирт, скёрт, юбка) – это тонкий ободок пластика вокруг периметра модели. Он не связан с моделью и не влияет на качество печати модели. Skirt позволяет контролировать работу экструдера непосредственно перед началом печати модели и насколько хорошо пластик прилипает к поверхности платформы. Skirt может печататься в один или несколько слоев.

При печати необходимо правильно располагать модель, так как зависимости точки приложения нагрузки, прочность модели будет разная, если вдоль слоев нагрузка, то модель не стойка к воздействиям, если поперек, то прочность модели увеличивается во много раз.

На рисунке 7.4 представлен пример модели, обработанной в слайсере CraftWare.

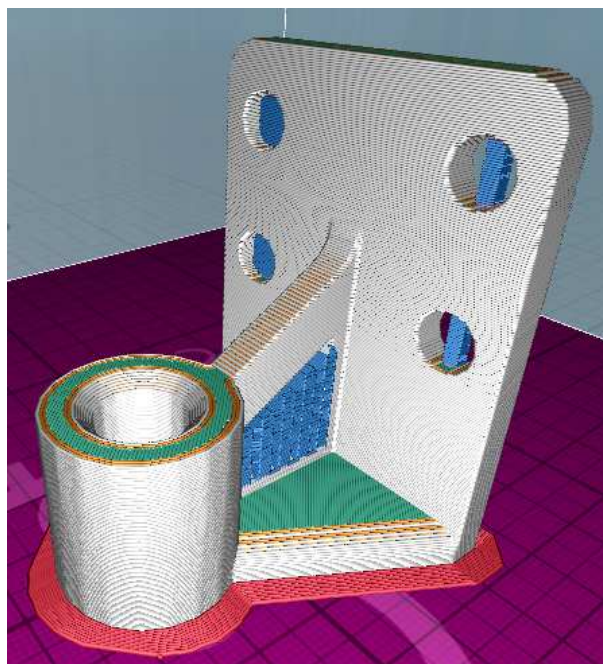


Рис. 7.4. Пример модели, обработанной в слайсере CraftWare

8. Новые направления в 3D печати

8.1. 3D-БИОПЕЧАТЬ

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

Первая производственная система для 3D-печати тканей, основанная на биопечатной технологии NovoGen, была представлена в 2009 году. Для описания этой исследовательской области используется целый ряд терминов: печать органов, биопечать, компьютерная тканевая инженерия и др.

Один из пионеров 3D-печати, исследовательская компания Organovo, проводит лабораторные исследования и развивает производство функциональных трехмерных образцов человеческих тканей для использования в медицинских и терапевтических исследованиях. Для биопечати компания использует 3D-принтер NovoGen MMX. Organovo считает, что биопечать позволит ускорить тестирование новых медицинских препаратов перед клиническими испытаниями, что позволит экономить время и средства, вкладываемые в разработку лекарств. В

долгосрочной перспективе Organovo надеется адаптировать технологию биопечати для создания трансплантатов и применения в хирургии.

3D печать используется для создания имплантатов и устройств, применяемых в медицине. Успешные операции включают такие примеры, как вживление титановых тазовых и челюстных имплантатов (рис. 8.1), а также пластиковых трахеальных шин. Наиболее широкое применение 3D-печати ожидается в производстве слуховых аппаратов и стоматологии. В марте 2014 года хирурги из Суонси использовали 3D печать для реконструкции лица мотоциклиста, получившего серьезные травмы в дорожной аварии.



Рис. 8.1. Медицинские имплантаты из титана, созданные с помощью технологии EBM

Во всем мире ученые решают проблемы нехватки органов для трансплантации их человеку. Выдвигаются различные идеи и гипотезы, вплоть до пересадки людям органов от свиньи или выращивания их на специальных каркасах в теле животного. Переоценить значимость этого трудно, особенно в случае с почкой. По статистике Всемирной организации здравоохранения, в мире ежегодно делается более 100 тыс. операций по трансплантации органов (не более 10 % от требуемых), из них почти 70 тыс. приходится на почку. В России 20 тыс. человек на диализе. Пока у них есть лишь призрачная надежда на пересадку. Ученые говорят о существовании «доказательства технологии» – возможности создания трехмерного органа из человеческих клеток для имплантации на 3D принтере. Но до сих пор «напечатанные» органы – это лишь лабораторные экспонаты.

Процесс биопечати состоит из следующих этапов. Сначала создается компьютерная модель органа, который предварительно сканируется. Для самого процесса биопечати нужны биочернила – живые клетки, биобумага – гидрогель, «носитель» или «клей» для клеток, и принтер, который «фабрикует» конструкт органа из множества слоев клеточного материала. В итоге получается упрощенный функциональный орган. Причем при известной степени развития технологии он будет делаться из клеток самого пациента, что решит проблему с отторжением донорских органов,

из-за чего многие пациенты всю жизнь после пересадки принимают жизненно необходимые лекарства.

Первый патент в области трехмерной биопечати был получен в начале 2000-х. Сегодня биопринтеры и оборудование для лабораторий делают несколько десятков компаний. Лидирует по динамике патентных заявок американская Organovo, собравшая первый биопринтер Novogev MMX. Российская лаборатория 3D Bioprinting Solutions (основной инвестор – медицинская компания «Инвитро») открылась в 2013 году.

Компании используют разные биоматериалы и роботические устройства. 3D Bioprinting Solutions работает по технологии, которую при участии научного руководителя лаборатории Владимира Миронова, одного из основоположников технологии трехмерной биопечати и профессора инженерной школы департамента химико-биологической инженерии Университета штата Вирджиния (США), начинали разрабатывать в Южной Каролине. Это метод печати не отдельными клетками, а их агломератами – так называемыми сфероидами (это довольно крупные частицы, каждая состоит из нескольких тысяч клеток в три раза толще человеческого волоса). Размещенные рядом, они сливаются, образуя микроткань. Этот естественный процесс известен из эмбриогенеза. Плюс метода в том, что с помощью таких «биологических ячеек» орган можно построить, не используя дополнительных биоматериалов; кроме того, сильно увеличивается скорость печати.

В 3D Bioprinting Solutions освоили технологии массового производства тканевых сфероидов стандартного размера: для этого клетки помещают в установку с агарозным гелем (гель, предназначенный для выращивания бактерий) в виде туннелеобразной структуры, в которой они собираются в шарообразные конструкторы.

В 3D Bioprinting Solutions в 2014 году создали в 3D биопринтер «Фабион», печатающий сфероидами. На устройство и способы производства трехмерных объектов с его помощью получен патент. Подобными технологиями в России занимается еще несколько компаний, но формально разработка заявлена только у 3D Bioprinting Solutions, кстати, резидента кластера биомедицинских технологий фонда «Сколково».

У биопринтеров добавились новые форсунки. Всего их у биопринтера «Фабиона» пять, три из них для биочернил – либо сфероидов, либо клеток, заключенных в гель, еще две – для биобумаги. От зарубежных аналогов «Фабион» отличает способность работать с максимальным количеством материалов.

Перовой «распечаткой» «Фабиона» стал конструктор щитовидной железы мыши из эмбриональных мышечных эксплантов, который затем имплантировали группе мышей. Щитовидку выбрали из-за относительного простоты ее структуры с анатомической и функциональной точки зрения. Для России этот эксперимент, проведенный в 2015 году, до сих пор

уникален, а в мире подобные уже проводились: американцы недавно напечатали синтетические яичники из желатиновых «чернил» на биопринтере и пересадили их бесплодным мышам, у которых потом родились мышата. В России же в основном печатают на 3D-биопринтере плоские структуры такие, как кожа или хрящ.

«Родная» щитовидная железа мыши была уничтожена радиоактивным ¹³¹-м йодом, в итоге уровень гормонов снизился до нуля. После пересадки конструкта, отпечатанного на принтере приблизительно за двадцать минут, через несколько недель подсаженный под капсулу почки «тканеинженерный конструкт» восстановил функцию щитовидки более чем на 50 %. Под почку щитовидку подсадили потому, что там удобно сделать «карман» и быстро формируются новые кровеносные сосуды.

Эксперимент провели «всем миром» - с широким международным сотрудничеством.

Очевидно, что следующий логический шаг ученых после печати щитовидной железы мыши – железа человеческая. Пока не реализована технология, которая в дальнейшем должна раз и навсегда решить вопрос с клеточным материалом для биопечати: когда будут выделять стволовые клетки, а затем «размножать» их, наращивать до нужного объема и программировать. «Находкой» для биопринтинга могут стать индуцированные плюрипотентные стволовые клетки (IPS-клетки), за открытие которых в 2012 году была присуждена Нобелевская премия. По функциям они близки к настоящим эмбриональным. Есть исследования, доказывающие, что из них можно получить клеточные ткани, специфичные для того или иного органа.

Получив необходимое количество клеток, нужно еще преобразовать их в сфероиды. По расчетам ученых, для создания органов потребуются сотни тысяч единиц. А значит, нужно будет роботизированное производство сфероидов индустриального масштаба.

Второе узкое место биопечати на сегодня – необходимость создавать не просто конструкт органа, но и артериальную, венозную, выводную системы. Иными словами, построить сосудистое «дерево» внутри органа. У ученых уже есть понимание, как с помощью различных типов сфероидов можно напечатать артерии и капилляры. По большому счету, непреодолимых технологических барьеров создания жизнеспособных печатных органов не существует.

3D Bioprinting Solutions готова развивать новые технологии биопечати, ведь существующие не обеспечивают прорыва. Две новые технологии, которые лаборатория пытается сейчас реализовать, – биопринтинг, основанный на управлении силами Фарадея и магнитной левитации, а также акустический биопринтинг. В этом году планируется сделать магнитный принтер.

Суть метода в том, что с помощью магнитного поля, математически смоделированного, можно манипулировать сфероидными клетками. Под действием магнитных волн клетки собираются в конструкции нужной формы, сфероиды, сделанные из хрящевой ткани барана, левитируют на специальной подложке, растягиваются и стягиваются. К примеру, шарообразную структуру из сфероидов можно сделать таким образом почти мгновенно – а при классических аддитивных технологиях нужно выдавливать слой за слоем из экструдера.

С магнитным принтером связан совместный проект 3D Bioprinting Solutions и «Роскосмоса», который запланировал эксперимент по трехмерной печати живыми тканями на борту МКС в магнитной принтере. «Роскосмос» хочет исследовать влияние на человека гамма-излучения на человеческих клетках вместо «традиционных» мышей и крыс.

У «биоинженеров» тоже есть причины устремиться в космос. Чтобы создавать из сфероидов, например, трубчатые структуры в магнитной установке, приходится бороться с земной гравитацией, используя мощные магниты и парасупермагнетики, которые в высоких концентрациях токсичны для клеток. В космосе потребность в этом частично отпадет. Кроме того, в космосе можно наблюдать за поведением клеток в условиях микрогравитации: в невесомости повышается возможность слияния клеток и образования трехмерных структур. Клетки эндотелия начинают произвольно формировать сосуды, и если удастся взять эти процессы под контроль, возможно, получится создавать большие конструкции уже с сосудистым руслом.

В то же время 3D Bioprinting Solutions разрабатывает совместно с физфаком МГУ акустический принтер. Это один из первых в мире опытов такого рода. В акустической установке используется трехмерный «акустический пинцет». Изменяя амплитуду звука, можно перемещать клетки по горизонтали и вертикали и формировать из них трехмерные конструкции. Технология многообещающая, так как «акустический захват» – идеальный инструмент для манипулирования живыми клетками, не повреждающий их, в отличие, например, от лазерного 3D-биопринтера (когда сфероиды вылетают из принтера, часть клеток сразу разрывается).

3D Bioprinting Solutions поставляет свои принтеры в университеты. Обычно они используются для проведения исследований, в том числе по заказу фармацевтических компаний. Устройство в базовой комплектации стоит 150 тыс. долларов плюс сервисный контракт.

До тех пор пока не напечатаны и не пересажены человеческие органы, трудно говорить о больших коммерческих перспективах биопечати. По прогнозу National Intelligence Council (Национальный разведывательный совет США), к 2030 году с высокой вероятностью начнут массово пересаживать человеку плоские структуры – кожу и хрящевую ткань.

В Японии принята государственная программа разработки в области создания органов, которую финансирует государство. В США много лет работает Organovo – единственная в мире публичная компания в сфере биопринтинга с капитализацией более 250 млн. долларов. Но никто не может гарантировать, что именно в этих странах и произойдет прорыв. В научном мире не все определяется объемом финансирования, хотя оборудование для исследований очень дорогое. Но сработать может любая биотехнология, причем не обязательно это будет биопечать. Так что у небольших лабораторий, вероятно, такой же шанс на успех, как у гигантов, которые стоят сотни миллионов долларов. Определенно можно сказать только то, что количество участников рынка биопечати в ближайшей перспективе будет расти. (В. Колерова. Инженеры человеческого тела. «Эксперт» 2017, № 24, 12-18 июня).

8.2. Новые применения 3D печати

Будущее применение 3D-печати может включать создание научного оборудования с открытым исходным кодом для использования в открытых лабораториях и другого научного применения – реконструкции окаменелостей в палеонтологии, создания дубликатов бесценных археологических артефактов, реконструкции костей и частей тел для судебно-медицинской экспертизы, реконструкции сильно поврежденных улик, собранных с мест преступлений. Технология также рассматривается для применения в строительстве.

В 2005 году академические журналы начали публиковать материалы по возможности применения технологий 3D-печати в искусстве. В 2007 году Wall Street Journal и журнал Time включили 3D-дизайн в список 100 самых значительных достижений года. В Музее Виктории и Альберта на Лондонском дизайнерском фестивале в 2011 году была представлена экспозиция Мюррэя Мосса под названием «Индустриальная революция 2.0: как материальный мир материализуется заново», посвященная технологиям 3D-печати.

В 2012 году экспериментальный проект Университета Глазго показал, что 3D печать может быть использована для производства химических соединений, включая доселе неизвестные. В ходе проекта были напечатаны сосуды для хранения химических реагентов, в которые с помощью аддитивных установок впрыскивались «химические чернила» с последующей реакцией. Состоятельность технологии была доказана производством новых соединений, но конкретное практическое применение в ходе эксперимента не преследовалось. Лаборатория Cornell Creative Machines подтвердила возможность создания пищевых продуктов с помощью гидроколлоидной 3D-печати. Профессор Лерой Кронин из

Университета Глазго предложил использовать «химические чернила» для печати медицинских препаратов.

Использование технологий 3D-сканирования позволяет создавать реплики настоящих объектов без использования литейных методов, требующих высоких затрат, сложных в исполнении и способных оказывать разрушающее воздействие в случаях с драгоценными и хрупкими объектами культурного наследия.

Дополнительным примером разрабатываемых технологий трехмерной печати служит применение аддитивного производства в строительстве. Это могло бы позволить ускорить темпы строительства с одновременным снижением стоимости. В частности, рассматривается возможность использования технологии для постройки космических колоний. Например, проект Sinterhab направлен на исследование возможности аддитивного производства лунных баз с использованием лунного реголита в качестве основного строительного материала. Вместо использования связующих материалов, рассматривается возможность микроволнового спекания реголита в цельные строительные блоки.

Аддитивное производство позволяет создавать волноводы, муфты и изгибы в терагерцевых устройствах. Высокая геометрическая сложность подобных изделий не могла быть достигнута традиционными производственными методами. Коммерчески доступная профессиональная установка EDEN 260V была использована для создания структур с разрешением в 100 микрон. Напечатанные структуры были гальванизированы золотом для создания терагерцевого плазмонного аппарата.

Китай выделил почти \$500млн. на развитие 10 национальных институтов по разработке технологий 3D-печати. В 2013 году китайские ученые приступили к печати живых хрящевых, печеночных и почечных тканей с помощью специализированных 3D-биопечатных принтеров. Исследователи из Университета Ханчжоу Дианци даже разработали для этой сложной задачи собственный 3D-биопринтер, получивший название Regenovo. Один из разработчиков Regenovo, Сюй Минген, заявил, что принтеру требуется менее часа для производства небольшого образца печеночной ткани или четырех-пяти дюймового образца ушного хряща. Сюй предсказывает появление первых полноценных печатных искусственных органов в течение следующих 10-20 лет. В том же году исследователи из бельгийского Университета Хасселта успешно распечатали новую челюсть для 83-летней женщины. После вживления имплантата пациент может нормально жевать, разговаривать и дышать.

В Бахрейне 3D печать материалами, напоминающими песок, позволила создать уникальные структуры для поддержки роста кораллов и восстановления поврежденных рифов. Данные структуры имеют более

натуральную форму, чем конструкции, использовавшиеся ранее, и не обладают кислотностью бетона.

Глоссарий

Additive fabrication (AF) – стандартизированное обобщающее англоязычное название аддитивных технологий; аддитивные технологии.

Additive manufacturing (AM) – тоже, что и Additive fabrication (AF).

Additive processes – аддитивный процесс.

Additive systems – машины и оборудование, обеспечивающие аддитивный процесс изготовления изделия.

AF - аббревиатура Additive fabrication.

AM – аббревиатура Additive Manufacturing.

AMF – Additive Manufacturing File, формат компьютерных данных, альтернативный формату Stl., применяемому с 1987 г. в качестве базового для передачи данных компьютерной 3D-модели в аддитивную машину для построения физической модели. AMF базируется на языке XML (Extensible Markup Language – расширяемый язык разметки) и поддерживает размерности, цвета, текстуры, триангуляцию, сетчатые структуры, которые Stl-формат не поддерживает; более компактный, чем Stl-файл.

ASTM International – American Society for Testing and Materials – организация в США, которая занимается разработкой технических стандартов для широкого спектра материалов, изделий, систем и услуг, в частности и в области аддитивных технологий.

Bed Deposition – один из основных видов аддитивных технологий; предполагает предварительное формирование слоя построения в виде равномерно распределенного по всей поверхности рабочей платформы сыпучего или жидкого строительного материала, а затем селективное отверждение фрагментов сформированного слоя в соответствии с текущим сечением CAD-модели, например, путем спекания, сплавления, склеивания или полимеризации частиц модельного материала.

Binder jetting – стандартизированное название одного из аддитивных процессов, согласно которому построение изделия ведется посредством связующего состава, селективно связывающего частицы сыпучего модельного материала.

Blueprinter – название компании-производителя AM-машин (Дания); в машинах используется технология спекания порошковый полимеров за счет инфракрасного излучения, генерируемого посредством специальных нагревательных приборов, размещенных в подвижной головке.

CAD\CAM\CAE - сочетание, подразумевающее использование всего комплекса цифровых технологий: CAD – проектирование (Computer-Aided Design), CAM - материализация на технологическом оборудовании посредством числового программного управления (Computer-Aided Manufacturing), CAE – расчет и анализ посредством

специализированного программного обеспечения (Computer-AidedEngineering).

CIM-технологии – Ceramic Injection Molding, разновидность PIM-технологий, одно из направлений порошковых технологий; предполагает последовательное выполнение следующих операций: смешение керамического порошка со связующим-пластификатором (обычно полимером), формование (обычно в машине типа термопластавтомата), получение таким образом «грин-модели» с последующим удалением связующего и спеканием в специальных печах.

Concept Laser - компания-производитель АМ-машин (Германия).

Direct Deposition – «непосредственное нанесение материала», один из основных видов аддитивных технологий; предполагает подачу строительного материала (в виде прутка, пасты, вдуваемого порошка) непосредственно в то место, где в данный момент времени происходит процесс послойного синтеза.

Directedenergydeposition – стандартизованное название одного из аддитивных процессов, согласно которому строительный материал и энергия для его сплавления подводятся одновременно в место построения изделия.

DLP – Digital Light Procession, название процесса, применяемого в АМ-машинах компании Envisiontec.

DM – Direct Manufacturing, одно из названий аддитивного процесса, разработанного компанией Sciaky (США).

DMD – Direct Metal Deposition, непосредственное нанесение металла, аббревиатура названия АМ-процесса и технологии.

DMF – Direct Metal Fabrication, общее название АМ-технологий, предполагающих послойный синтез изделий из металла, иногда используется в значении DMD.

DMLS - Directmetallasersintering, непосредственный лазерный синтез из металла (порошкового), наименование АМ-технологии, разработанной компанией EOS (Германия).

EIGA-технология - Electrodeinductionguideinertgasatomization, разновидность технологии газовой атомизации для получения порошков реактивных и жаропрочных сплавом посредством индукционной плавки и распылением инертным газом.

EOS – Electro Optical Systems GmbH, компания-производитель АМ-машин (Германия).

Euromold – крупнейшая ежегодная выставка аддитивных технологий и оборудования (Франкфурт-Майн, Германия).

EBM – Electron Beam Melting, аббревиатура название аддитивного процесса, в котором сплавление модельного материала производят посредством электронного луча (компания Arcam, Sciaky).

Fcubic – название одной из аддитивных технологий и компании, ее разработавшей; в настоящее время приобретена компанией 204 Höganäs AB (Швеция); особенность технологии в том, что вместо связующего, при построении грин-модели впрыскивают специальный состав, ускоряющий поглощение теплового излучения. После построения грин-модель не извлекают из массива материала, а вместе с ним помещают в печь, где происходит спекание обработанной указанным составом модели, тогда как не обработанная часть материала остается не спеченной.

FDM – Fused Deposition Modeling, название АМ-технологии компании Stratasys; относится к категории Material extrusion.

HIP – Hot Isostatic Pressure, горячее изостатическое прессование; технология, применяемая для постобработки синтезированных изделий, в частности, из алюминия и титановых сплавов с целью устранения внутренней микропористости.

Höganäs AB – компания-производитель АМ-машин (Швеция); использует технологию fcubic. Jetting – «струйные технологии», стандартизованное название одного из аддитивных процессов, согласно которому строительный материал или связующий состав подводится в зону построения изделия (обычно) посредством многосопловых устройств в виде подвижных в плоскости X-Y рабочих головок.

Ink-Jet – то же, что и Binderjetting

LaserCUSING – фирменное название аддитивного процесса (компания Concept Laser, Германия).

Kira – компания-производитель АМ-машин (Япония), работающих по технологии Sheet Lamination.

LENS – Laser Engineered Net Shape, фирменное название аддитивного процесса, разработанного компанией Optomec (США).

Lithoz – компания-разработчик АМ-технологии.

LCM – Lithography-based Ceramic Manufacturing (Австрия); технология предполагает фотосинтез грин-модели изделия из жидкого фотополимера с высоким содержанием керамической компоненты с последующим спеканием грин-модели в печи.

Material extrusion – стандартизованное название одного из аддитивных процессов, согласно которому построение изделия ведется посредством экструзии пластифицированного тем или иным способом строительного материала.

Matsuura – компания-производитель АМ-машин (Япония) работающих по технологии Multi-functional.

Mcor Technology – компания-производитель АМ-машин (Ирландия), работающих по технологии Sheet Lamination.

MJS – Multiphase Jet Solidification, название одной из АМ-технологий, в соответствии с которой модельный материал в виде

пластифицированного с помощью полимерной пасты металлического порошка подают через экструдер в зону построения.

MIM-технология – Metal Injection Molding, разновидность PIM-технологий, одно из направлений порошковых технологий; предполагает последовательное выполнение следующих операций: смешение металлопорошковой композиции со связующим пластификатором (обычно полимером), формование (обычно в машине типа термопласт-автомата), получение таким образом «грин-модели» с последующим удалением связующего и спеканием в специальных печах.

MLS – Micro Laser Sintering, общее название технологий лазерного синтеза изделий с малыми размерами, обычно менее 5 мм.

MLS – Micro Light Switch, микро-механические затворы (работающие по принципу «да-нет»), через которые производится выборочное облучение фотоотверждаемой смолы.

MTT Technologies - компания-производитель АМ-машин (Великобритания), в настоящее время входит в состав компании Renishaw.

Multi-functional – «многофункциональные технологии», стандартизованное название одного из основных видов аддитивных технологий, предполагающих использование в процессе построения не только аддитивных процессов, например, фрезерования.

NIST – National Institute of Standards and Technology, Национальный институт стандартов и технологий, США.

Objet Geometry – компания-производитель АМ-машин (Израиль), работающих по технологии PolyJet.

Optomec - компания-производитель АМ-машин (США), работающих по технологии LENS.

Phenix Systems - компания-производитель АМ-машин (Франция) для синтеза изделий из металлопорошковых и керамических композиций.

PIM-технологии – Powder Injection Molding, общее название порошковых технологий, предполагающих получение изделий из порошковых материалов методами, похожими на литье пластмасс в термопласт-автоматах. Подразделяются на CIM-технологии (Ceramic Injection Molding) и MIM-технологии (Metal Injection Molding).

Poly Jet – название АМ-технологии, в соответствии с которой жидкий модельный материал, как правило, фотополимер, подают в зону построения с помощью многоструйной головки.

Powderbedfusion – стандартизованное название аддитивной технологии, согласно которой в процессе построения на рабочей платформе предварительно формируют слой строительного материала и затем часть материала в соответствии с данными текущего сечения CAD-модели связывают (сплавляют, склеивают) тем или иным способом.

ProMetal – компания-производитель АМ-машин (Германия), работающих по технологии Ink-Jet, в настоящее время входит в состав компании ExOne (США).

RapidPrototyping, RP-технологии – устаревшее, но еще употребляющееся название аддитивных технологий.

Sciaky – компания-производитель АМ-машин (США), использующая технологию Directedenergydeposition (наварка металла посредством EBM).

Realizer – компания-производитель АМ-машин (Германия) для синтеза изделий из металлопорошковых композиций по технологии SLM.

Renishaw – многопрофильная компания, производитель АМ-машин (Великобритания), работающих по технологии SLM.

REP – Rotating Electrode Process.

RP-технологии – тоже, что и Rapid Prototyping.

Sciaky – компания-производитель АМ-машин, работающих по DMD-технологии (США).

Sheetlamination – название одного из видов АМ-технологий; предполагает построение изделия из листовых модельных материалов.

SHS - SelectiveHeatSintering, название аддитивной технологии, разработанной компанией Blueprinter (Дания).

SIS - SelectiveInhibitionSintering, технология, в соответствии с которой на неотверждаемую в АМ-процессе часть материала наносят ингибитор – раствор соли металла.

SLA – от StereolithographyApparatus, общее название технологии и машин, работающих по технологии лазерного послойного отверждения фотополимерных смол.

SLM – SelectiveLaserMelting (селективное лазерное сплавление), название АМ-процесса.

SLM Solutions – компания-разработчик SLM-технологии и производитель АМ-машин (Германия).

SLS - SelectiveLaserSintering, селективное лазерное спекание, обобщенное название одного из видов АМ-технологий.

SMS - SelectiveMaskSintering, название АМ-процесса, в котором спекание сыпучего модельного материала производят за счет теплового воздействия специальными нагревательными приборами, формирующими «маску» (образ, контур) сечения строящегося изделия.

SolidimensionLtd. – компания-производитель АМ-машин, работающих по технологии Sheetlamination, в настоящее время вне бизнеса, (Израиль).

Solidica – компания-производитель АМ-машин (США); использует технологию ультразвуковой сварки листовых материалов с последующим фрезерованием каждого слоя.

Solidscape – компания-производитель АМ-машин (США).

SPLS - SolidPhaseLaserSintering, фирменное название аддитивного процесса, разработанного компанией PhenixSystems (Франция).

Sprayforming – прогрессивная технология в металлургии, позволяющая получать «выращенные» болванки (заготовки для последующих переделов) путем газовой атомизации расплава и осаждения распыливаемого металла на подложку.

Steriolithography – слереолитография (лазерная), название процесса, в соответствии с которым модельный материал в виде жидкого фотополимера отверждают послойно посредством лазерного луча.

Stl (формат) – сокращение от Steriolithography, формат файлов, применяемый с 1987 г. в качестве базового для передачи данных компьютерной 3D-модели в аддитивную машину для построения физической модели.

Stratasys – компания-производитель АМ-машин (США), работающих по технологии MaterialExtrusion.

UAM – Ultrasonicadditivemanufacturing, название технологии компании Fabrisonic (США), в соответствии с которой тонкие металлические пластины сваривают с помощью ультразвука и затем «лишний» металл удаляют фрезерованием.

Vatphotopolymerization – один из основных АМ-процессов, предполагающий полимеризацию жидкого фотополимера, находящегося в открытой ванне в рабочей камере АМ-машины, посредством светового воздействия, например, лазером.

VIGA –VacuumInductionMeltInertGasAtomization, технологический процесс и установки для получения порошков металлов методом газовой атомизации; компания ALD (Германия).

VIM – VacuumInductionMelting, вакуумная индукционная плавка, процесс, используемый для вакуумного литья жаропрочных и реактивных металлов, а также для получения металлопорошковых композиций путем газовой атомизации.

Voxeljet – VoxeljetTechnologyGmbH, компания-производитель АМ-машин (Германия).

ZCorp – Z Corporation, компания-производитель АМ-машин.

Список использованной литературы

1. Портал течения RepRap [Электронный ресурс]
<http://reprap.org/wiki/RepRap>
2. Самореплицирующаяся машина [Электронный ресурс]
http://en.wikipedia.org/wiki/Self-replicating_machine
3. Что такое RepRap? [Электронный ресурс]
<http://reprap.org/wiki/RepRap/ru>
4. Слюсар, В.И. Фаббер-технологии: сам себе конструктор и фабрикант. Конструктор. – 2002. - № 1. С. 5 - 7. (2002).
5. 3D CAD, CAM and Rapid Prototyping by Mitch Heynick and Ivo Stotz [Электронный ресурс] <http://enac-os.epfl.ch/files/content/sites/enacco/files/3D%20CAD%20CAM%20and%20Rapid%20PrototypingV1.1.pdf>
6. История появления 3D печати [Электронный ресурс]
<http://3dcorp.ru/story.html>
7. Струйная трехмерная печать (3DP) [Электронный ресурс]
http://3dtoday.ru/wiki/3DP_print
8. Прямое лазерное спекание металлов [Электронный ресурс] (DMLS)
http://3dtoday.ru/wiki/DMLS_print/
9. Стереолитография [Электронный ресурс] (SLA или SL)
http://3dtoday.ru/wiki/SLA_print/
10. Материал нейлон [Электронный ресурс] <http://3dtoday.ru/wiki/neylon/>
11. Материал laywoo_d3 [Электронный ресурс]
http://3dtoday.ru/wiki/laywoo_d3
12. Материал PVA [Электронный ресурс] http://3dtoday.ru/wiki/pva_plastic
13. Сайт центра 3D-технологий «3D Life» <http://www.3dlifelab.ru>
14. Группа «Вконтакте» центра 3D-технологий «3D Life»
http://vk.com/3dlife_vlz
15. Аддитивные технологии <http://edudop.ru/mod/page/view.php?id=24506>
16. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. М.: Научные основы и технологии, 2011.-382с.
17. Кербер М.Л., Буканов А.М., Вольфсон С.И., Горбунова И.Ю., Кандырин Л.Б., Сирота А.Г., Шерышев М.А. Физические и химические процессы при переработке полимеров. М.: Научные основы и технологии. 2013.-402с.
18. Технология резины: Рецептуростроение и испытания / Под ред. Дика Дж. С. – Спб : Научные основы и технологии, 2010.-620с.
19. Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов: Учебник для вузов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: НППА «Истек», г. Москва, 2009.- 504 с.

20. Н.Миллс Конструкционные пластики – микроконструктора, характеристики, применения. Пер. с англ.: Учебно-справочное руководство / Н. Миллс – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. – 512 с. ISBN 978-5-91559-047-1
21. Баженов С.Л., Берлин А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы: Научное издание / Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. – 352 с.
22. Основы технологии переработки пластмасс. Учебник для вузов/ С.В. Власов, Л.Б. Кандырин, В.Н. Кулезнев и др. . – М.: Химия, 2004. – 600 с.
23. Производство изделий из полимерных материалов. Учеб. пособие/ Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д. – СПб.: Профессия, 2004.- 464с.
24. Кербер М.Л., Буканов А.М., Вольфсон С.И., Горбунова И.Ю., Кандырин Л.Б., Сирота А.Г., Шерышев М.А. Физические и химические процессы при переработке полимеров. М.: Научные основы и технологии. 2013.-402с.
25. Каблов, В.Ф. Компьютерный дизайн полимерных материалов – структура и свойства // Проблемы шин, РТИ и эластомерных композитов: докл. ,2014 г. / ООО ВЕСКОМ, «НИИШП». - М., 2014. - С. 41-50.
26. Каблов, В.Ф., Бойцов, Е.П., Синьков, А.В., Благинин, С.И. Использование 3D-печати для создания новых полимерных материалов с заданной структурой // Каучук и резина – 2015: : матер. (тез.) докл. V всерос. конф. (г. Москва, 22-23 апр. 2015 г.) / ООО «НИИЭМИ», - Москва, 2015. - С. 42-43 (рус.) ; С. 87 (англ.).
27. Каблов В.Ф., Бойцов Е.П., Синьков А.В., Благинин С.И.Получение новых полимерных материалов заданной структуры с применением 3D печати. Электронный ресурс. ВИАМ. <http://conf.viam.ru/conf/180/proceedings>
28. <http://www.orgprint.com/wiki/3d-pechat/materialy-dlja-3d-pechat>
29. <http://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/chemson-pacific-is-preparing-3dviny-is-the-first-filament-for-3d-prin/>
30. <http://www.orgprint.com/wiki/3d-pechat/materialy-dlja-3d-pechat>
31. <http://3dwiki.ru/kaj-parti-sozdal-eksperimentalnye-filamenty-lay-ceramic-i-poro-lay/>
32. 3D печать, кратко и максимально ясно. <http://3dtoday.ru/upload/files/books/3Dprintbook.pdf>
33. М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ Рекомендовано Учебно-методическим объединением по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов высших

- учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров «Технологические машины и оборудование» Издательство политехнического университета Санкт-Петербург , 2013-222с.
34. Биопечать. Эксперт 2017, № 24.
 35. <http://volgobot.com/reference.html>
 36. [Энциклопедия 3D печати 3DToday. http://3dtoday.ru/wiki/](http://3dtoday.ru/wiki/)
 37. В.Колерова. Инженеры человеческого тела. «Эксперт» , 2017, №24, с.50-52.

Электронное учебное издание

Виктор Федорович **Каблов**
Алексей Владимирович **Синьков**

Аддитивные технологии в производстве полимерных изделий

Учебное пособие

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан 2018 г. Поз. № 17.

Подписано к использованию 28.02.2018. Формат 60х84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 6,69.

Волгоградский государственный технический университет.

400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.

404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.