

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

А.А. Ляпков

ПОЛИМЕРНЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство

Томского политехнического университета

2016

УДК 678+681.625.9-023.5:004.356.2

ББК 30.6-5-05

Л00

Ляпков А.А.

Л00 Полимерные аддитивные технологии: учебное пособие / А.А. Ляпков; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 114 с.

В пособии рассматриваются возможности и тенденции развития современных методов 3D-печати полимерами. Показаны основные разновидности и особенности полимерных аддитивных технологий. Пособие подготовлено на кафедре технологии органических веществ и полимерных материалов Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. Пособие предназначено для слушателей курсов ФПК ТПУ, а также будет полезно бакалаврам, магистрам, аспирантам и инженерно-техническим работникам полимерных специальностей.

УДК 678+681.625.9-023.5:004.356.2

ББК 30.6-5-05

Рецензенты

Доктор химических наук, профессор
Лаборатория каталитических исследований ТГУ, в.н.с.

А.Г. Филимошкин

Кандидат химических наук, с.н.с.
Директор ООО «РОМ-ДМ», Красноярск

Р.В. Аширов

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2016

© Ляпков А.А., 2016

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Что такое аддитивные технологии?.....	5
Преимущества аддитивных технологий.....	5
Аддитивное производство: технологии и материалы.....	7
Немного истории.....	10
Полимерные материалы	12
Понятие полимерных материалов.....	12
Основные сведения о полимерных материалах	13
Групповая классификация и типизация полимерных материалов	13
Основы реологии расплавов полимеров	23
Основные виды деформации.....	23
Упругая и пластическая деформация	25
Экструзия как базовый процесс для аддитивных технологий.....	31
Технологии 3D-печати	35
FDM — моделирование методом осаждения расплавленной нити.....	35
Рабочая платформа	41
Механизмы позиционирования.....	44
Управление	46
Разновидности FDM-принтеров	49
Материалы для FDM-печати.....	56
SLA — лазерная стереолитография	63
Лазеры и проекторы	65
Кювета и смола	67
Разновидности стереолитографических принтеров	70
SLS — селективное (выборочное) лазерное спекание.....	72
История	72
Технология	73
Материалы и применение.....	75
LOM — производство изделий послойным ламинированием	78
История возникновения LOM-технологии	79
Технология 3D-печати методом ламинирования	79
Особенности технологии LOM.....	81
Используемые материалы и оборудование	81
Сферы применения метода ламинирования	84
Стоимость изделий	87
Преимущества и недостатки LOM 3D-печати	87
MJM — Технология многоструйного моделирования	89
Процесс	89
Особенности технологии MJM	91
Материалы и оборудование	91
Технология PolyJet	95
История технологии	97
Используемые материалы и оборудование	97
Процесс PolyJet Matrix	101
Преимущества и недостатки технологии	102
3DP — Струйная технология 3D-печати.....	104
CLIP (Continuous Liquid Interface Production)	107
Выводы	111
Литература.....	112

ПРЕДИСЛОВИЕ

Пластмассы – материалы на основе органических синтетических или природных полимеров, из которых можно после нагрева и приложения давления формовать изделия сложной конфигурации. Полимеры – это высокомолекулярные соединения, состоящие из длинных молекул с большим количеством одинаковых группировок атомов, соединенных химическими связями. Кроме полимера в пластмассе могут быть некоторые добавки. Переработка пластмасс – это совокупность технологических процессов, обеспечивающих получение изделий – деталей с заданными конфигурацией, точностью и эксплуатационными свойствами. Высокое качество изделия будет достигнуто, если выбранный материал и технологический процесс будут удовлетворять заданным эксплуатационным требованиям изделия: электрической, механической прочности, химической стойкости, плотности, прозрачности, и т.п.

Применение новых технологий – главный тренд последних лет в любой сфере промышленного производства. Каждое предприятие в России и мире стремится создавать более дешевую, надежную и качественную продукцию, используя самые совершенные методы и материалы. Использование аддитивных технологий – один из ярчайших примеров того, как новые разработки и оборудование могут существенно улучшать традиционное производство.

Интенсивность развития аддитивных технологий не имеет аналогов. Эти технологии принципиально изменили процессы проектирования и конструирования изделий, превратив их в процессы непрерывного создания изделий.

ЧТО ТАКОЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ?

Аддитивные технологии производства позволяют изготавливать любое изделие послойно на основе компьютерной 3D-модели. Такой процесс создания объекта также называют «выращиванием» из-за постепенности изготовления. Если при традиционном производстве в начале мы имеем заготовку, от которой оптом отсекаем все лишнее, либо деформируем ее, то в случае с аддитивными технологиями из ничего (а точнее, из аморфного расходного материала) выстраивается новое изделие. В зависимости от технологии, объект может строиться снизу-вверх или наоборот, получать различные свойства.

Общую схему аддитивного производства можно изобразить в виде следующей последовательности:



Первые аддитивные системы производства работали главным образом с полимерными материалами. Сегодня 3D-принтеры, олицетворяющие аддитивное производство, способны работать не только с ними, но и с инженерными пластиками, композитными порошками, различными типами металлов, керамикой, песком. Аддитивные технологии активно используются в машиностроении, промышленности, науке, образовании, проектировании, медицине, литейном производстве и многих других сферах.

ПРЕИМУЩЕСТВА АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

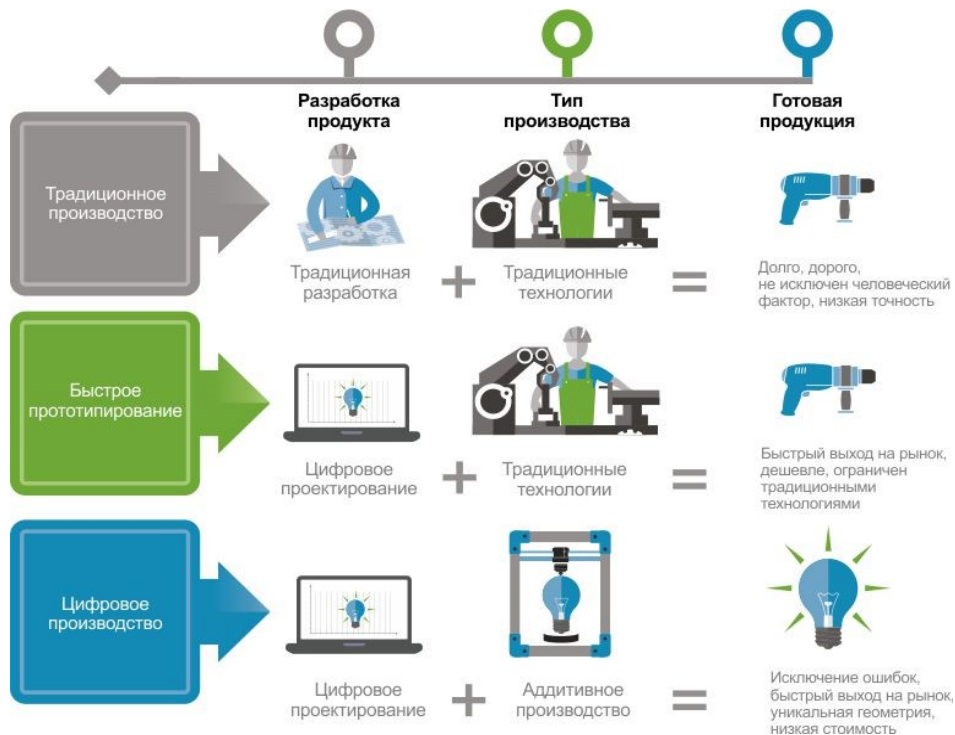
Аддитивные технологии или технологии послойного синтеза наиболее динамично развиваемое сегодня направление «цифрового» производства. Существует множество технологий, которые можно назвать аддитивными, поскольку объединяет их одно: построение модели происходит путем добавления материала (от англ. Add — «добавлять») в отличие от

традиционных технологий, где создание детали происходит путем удаления «лишнего» материала.

Основными преимуществами аддитивных технологий являются:

- Улучшенные свойства готовой продукции. Благодаря послойному построению, изделия обладают уникальным набором свойств. Например, детали, созданные на металлическом 3D-принтере по своему механическому поведению, плотности, остаточному напряжению и другим свойствам превосходят аналоги, полученные с помощью литья или механической обработки.
- Большая экономия сырья. Аддитивные технологии используют практически то количество материала, которое нужно для производства вашего изделия. Тогда как при традиционных способах изготовления потери сырья могут составлять до 80-85%.
- Возможность изготовления изделий со сложной геометрией. Оборудование для аддитивных технологий позволяет производить предметы, которые невозможно получить другим способом. Например, деталь внутри детали. Или очень сложные системы охлаждения на основе сетчатых конструкций (этого не получить ни литьем, ни штамповкой).
- Мобильность производства и ускорение обмена данными. Больше никаких чертежей, замеров и громоздких образцов. В основе аддитивных технологий лежит компьютерная модель будущего изделия, которую можно передать в считанные минуты на другой конец мира — и сразу начать производство.

Схематично различия в традиционном и аддитивном производстве можно изобразить следующей схемой:



АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО: ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ

Под аддитивным производством понимают процесс выращивания изделий на 3D-принтере по CAD-модели. Этот процесс считается инновационным и противопоставляется традиционным способам промышленного производства.

Сегодня можно выделить следующие технологии аддитивного производства:

- **FDM** (Fused deposition modeling) — послойное построение изделия из расплавленной пластиковой нити. Это самый распространенный способ 3D-печати в мире, на основе которого работают миллионы 3D-принтеров — от самых дешевых до промышленных систем трехмерной печати. FDM-принтеры работают с различными типами пластиков, самым популярным и доступным из которых является ABS. Изделия из пластика отличаются высокой прочностью, гибкостью, прекрасно подходят для тестирования продукции, прототипирования, а также для изготовления готовых к эксплуатации объектов.



- **SLA** (сокращенно от Stereolithography) — лазерная стереолитография, отверждение жидкого фотополимерного материала под действием лазера. Эта технология аддитивного цифрового производства ориентирована на изготовление высокоточных изделий с различными свойствами.



- **SLS** (Selective laser sintering) — селективное лазерное спекание полимерных порошков. С помощью этой технологии можно получать большие изделия с различными физическими свойствами (повышенная прочность, гибкость, термостойкость и др).



В отдельную категорию стоит вынести технологии быстрого прототипирования. Это способы 3D-печати, предназначенные для получения образцов для визуальной оценки, тестирования или мастер-моделей для создания литейных форм.

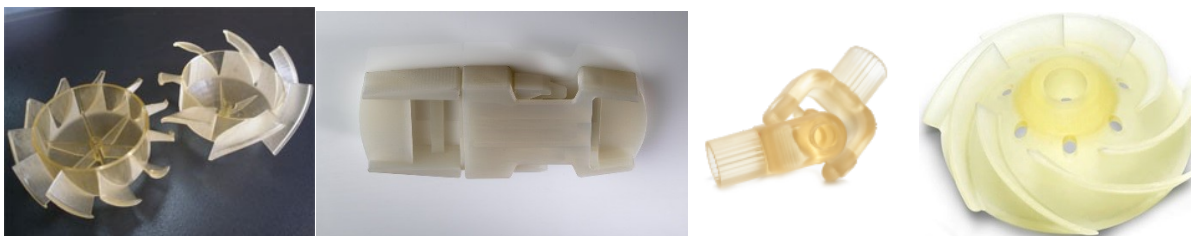
- **LOM** (Laminated Object Manufacturing) – изготовление объектов методом ламинирования. Метод подразумевает последовательное склеивание листового материала (бумаги, пластика, металлической фольги) с формированием контура каждого слоя с помощью лазерной резки. Объекты, производимые этим методом, обычно подлежат дополнительной механической обработке после печати. Толщина наносимого слоя напрямую зависит от толщины используемого листового материала.



- **MJM** (Multi-jet Modeling) — многоструйное моделирование с помощью фотополимерного материала. Эта технология позволяет изготавливать выжигаемые или выплавляемые мастер-модели для литья, а также — прототипы различной продукции.



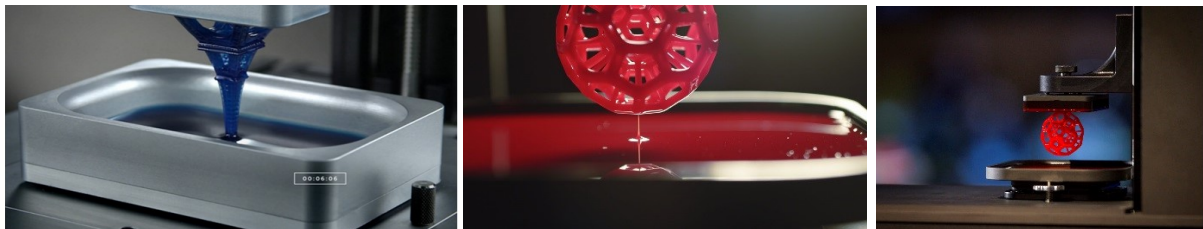
- **PolyJet** — отверждение жидкого фотополимера под воздействием ультрафиолетового излучения. Технология используется для получения прототипов и мастер-моделей с гладкими поверхностями.



- **3DP** (Струйная трехмерная печать) — струйная трехмерная печать подразумевает послойное построение физических объектов на основе цифровой трехмерной модели. Контуры модели вычерчиваются печатной головкой, наносящей связующий материал на тонкий слой всевозможных порошков. Таким образом, частицы каждого нового слоя склеиваются между собой и с предыдущими слоями до образования готовой трехмерной модели.



Ну и наконец – новейшая технология 3D-печати полимерами – **CLIP** (continuous liquid interface production) – технология непрерывного интерфейсного построения из жидкого полимера. Система печати оборудована емкостью с полимером, расположенной прямо над цифровой системой проецирования. Отверстие в емкости между проектором и полимером позволяет свету и кислороду достигать рабочего вещества, точно так же устроена контактная линза. В отличие от всех существующих 3D-технологий, «печать» происходит не послойно, а непрерывно, путем взаимодействия ультрафиолетового излучения (способствует полимеризации) и кислорода (замедляет реакцию) с полимером.



Это позволяет добиться высокой прочности готовой «копии» и точности ее воспроизведения в 10 микрон. Стоит отметить, что печать на 3D-принтере по этой технологии происходит в 100 (!) быстрее, чем на любых подобных устройствах, известных ранее.

НЕМНОГО ИСТОРИИ

История разработки технологий 3D-печати начинается в 1986 году, когда был выдан первый патент на установку стереолитографии (SLA). Этот патент принадлежал Чаку Халлу, американскому инженеру, который в 1983 году разработал первую SLA-установку. После получения патента Халл создал компанию 3D Systems Corporation, которая и сейчас является одной из самых крупных и преуспевающих компаний — производителей оборудования 3D-печати. Первая коммерческая система быстрого прототипирования SLA-1 была выпущена компанией 3D Systems в 1987 году, первая продажа (после многочисленных тестов и испытаний) состоялась в 1988-м.

Помимо стереолитографии в тот же период начали развиваться и другие технологии 3D-печати. В 1987 году Карл Декерд, сотрудник Техасского университета, подал заявку на патент, описывающий процесс быстрого прототипирования изделий с помощью технологии селективного лазерного спекания (SLS). Технология лазерного спекания была лицензирована компанией DTM Inc., приобретенной впоследствии компанией 3D Systems.

В 1989 Скотт Крамп, один из основателей компании Stratasys Inc., заявил о разработке технологии послойного наплавления (FDM), которая до сих пор используется компанией Stratasys Inc. и применяется на различных машинах начального уровня других производителей.

Первым европейским производителем оборудования стала компания EOS GmbH (Германия), которая после разработок технологий стереолитографии сконцентрировала свои усилия на развитии технологий лазерного спекания. Первая установка стереолитографии STEREO 400 была

поставлена в 1990 году в отдел разработок концерна BMW, а в 1994-м была выпущена первая установка лазерного спекания пластиковых порошков (SLS) EOSINT P 350, а также разработана машина EOSINT M160 — прототип первой установки для изготовления металлических деталей методом прямого лазерного спекания (DMLS).

С середины 2000-х начала проявляться диверсификация в развитии технологий 3D-печати — разработки стали развиваться в двух различных областях. Во-первых, как существующие, так и новые компании — производители оборудования сфокусировали свои усилия на создании настольных машин, обладающих доступной стоимостью и простотой применения. Данные 3D-принтеры используют простейшие технологии (FDM, Digital Light Processing (DLP)), имеют небольшие (настольные) габариты и позволяют реализовать преимущества аддитивных технологий дома либо в офисе для быстрого создания концептуальных прототипов.

Второе направление развития технологий — дорогие промышленные установки, направленные на решение задач по изготовлению конечных изделий средними и большими тиражами, по созданию деталей сложной геометрии. Заказчиками данного оборудования являются предприятия авиационной, космической, автомобильной, машиностроительной, медицинской и других отраслей промышленности, использующие промышленные 3D-принтеры в собственных производственных процессах. Развитие данного сегмента оборудования направлено в сторону увеличения размеров, скорости и качества изготовления деталей, смещая производственную парадигму с традиционных технологий на аддитивные и определяя контуры приближающейся Третьей промышленной революции.

ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ПОНЯТИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Полимерами называют соединения, макромолекулы которых состоят из атомных группировок мономеров, последовательно связанных в виде цепи. Цепное строение макромолекул предопределяет повышенную прочность связей между ними, что обеспечивает возможность образования волокон и пленок. Другое свойство макромолекул – гибкость – обуславливает эластичность полимеров, т.е. способность к значительным, многократным, обратимым деформациям под действием малых нагрузок.

Вследствие большой молекулярной массы и цепного строения растворы полимерных соединений обладают высокой вязкостью. Часто достаточно нескольких процентов растворяемого вещества, чтобы раствор потерял текучесть.

Пластические массы или пластмассы – это группа материалов, состоящих полностью или частично из полимеров и обладающих на некоторой стадии переработки пластичностью. Пластичность – способность тела к пластической деформации, которая заключается в изменении формы тела под влиянием внешних механических усилий без нарушения связи между частицами. При этом новая форма сохраняется после прекращения внешних воздействий. Механическая прочность отдельных видов пластмасс превышает прочность дерева, металла и керамики, в то же время они значительно легче этих материалов. Пластические массы могут быть не только твердыми, но и эластичными, как каучук. Они отличаются высокими диэлектрическими свойствами и без труда подвергаются переработке в готовые изделия самых различных и сложных форм: легко прессуются, отливаются, шлифуются, полируются, вытягиваются в нити и пленки. Эти замечательные качества пластических масс обеспечили им широчайшее распространение в технике при изготовлении деталей машин, приборов, в производстве летательных аппаратов, автомобилей, вагонов, судов и т.п., в медицине, быту и сельском хозяйстве. Трудно назвать отрасль народного хозяйства, в которой бы не применялись пластические массы. Однако пластмассы имеют низкую теплостойкость, подвержены «старению». Большинство из них может работать при температурах до 150 °С и только некоторые до 300 °С. Старение

пластических масс – процесс, при котором под влиянием различных факторов (окисления, облучения и т.п.) изменяются состав и структура макромолекул.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Полимерные материалы (ПМ) – это материалы на основе полимеров (высокомолекулярных соединений), в состав которых может входить значительное число компонентов как органического, так и минерального происхождения, обеспечивающих реализацию в материале широкого спектра разнообразных свойств.

Термин полимерные материалы или пластмассы объединяет весьма значительный по объему и чрезвычайно обширный по номенклатуре и способам применения класс синтетических материалов с разнообразными физическими, технологическими, потребительскими и эксплуатационными свойствами. В настоящее время полимерные материалы используются во всех отраслях промышленности, сельского хозяйства, в обеспечении комфортной жизнедеятельности людей.

Полимерные материалы характеризуются сложным составом, обязательной частью которого, связующим, является синтетический полимер. В подавляющем большинстве случаев полимер объединяет компоненты в единое целое и поэтому называется связующим, в качестве которого могут использоваться все разновидности полимеров, то есть термопластичные и термореактивные, олигомеры и сополимеры, полимеры, сополимеры и высокополимеры. Кроме того, в ПМ могут входить различные наполнители и вещества, обеспечивающие те или иные технологические и потребительские качества (текучесть, пластичность, плотность, прочность, долговечность, негорючесть, тепло–или электропроводность, звукопоглощение и пр.).

ГРУППОВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ И ТИПИЗАЦИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Классификация полимеров заключается в делении их на три основных класса.

К первому классу можно отнести весьма обширную группу карбоцепных полимеров. В них макромолекулы наделены своеобразным скелетом, который выстроен непосредственно из атомов углерода. Представители

полимеров данного класса – полиэтилен (ПЭ), полистирол (ПС), поливиниловый спирт (ПВС), полипропилен (ПП), полиметилметакрилат (ПММА), полиизобутилен (ПИ) и другие.

Второй класс состоит из группы гетероцепных полимеров. Здесь макромолекулы, находящиеся в основной цепи, наряду с атомами углерода содержат и гетероатомы, такие как сера, азот, кислород. К представителям этого класса можно отнести многочисленные (как простые, так и сложные) полиэфиры (ПЭ), природные белки, полиуретаны (ПУ), полиамиды (ПА). Стоит отметить, что непосредственно к данному классу принадлежит и группа элементоорганических полимеров, например, полиэтиленоксид (ПЭО), полиэтилентерефталат (ПЭТ), полидиметилсилоксан (ПМС).

Классификация полимеров предполагает и наличие третьего класса. Третий класс полимеров включает в себя высокомолекулярные соединения, для которых характерна сопряженная система связей. Сюда относят полиацетилены, полиоксадиазолы, полифенилены, а также другие соединения.

К этому же классу принадлежит и группа хелатных полимеров. Состоят такие полимеры из самых различных элементов, способных образовывать координационные связи.

Классификация ПМ может быть основана на различных химических, физических, рецептурных, эксплуатационных, потребительских и иных признаках. Учитывая, что ПМ состоят из полимерного связующего и комплекса гетерофазных или иных по химическому строению относительно полимера компонентов, в данном курсе используется две группы квалификационных признаков, а именно – для полимеров и для материалов на их основе.

По поведению при нагревании полимеры подразделяются на термопластичные (термопласты), термореактивные (реактопласты), эластомерные (эластопласты) и термоэластомерные (термоэластопласты).

Термопласты при нагревании сохраняют химическое строение, при этом вследствие постепенного ослабления физических межмолекулярных связей они размягчаются и расплавляются. При охлаждении межмолекулярные связи восстанавливаются, расплав (размягченный полимер) затвердевает и полимер восстанавливает исходные физические свойства. Такая особенность позволяет многократно расплавлять (размягчать) и охлаждать синтезированные термопласты, что является основой их дальнейшей переработки в изделия. Термопласты (ПЭ, ПС, ПВХ и др.) перерабатывают в

изделия экструзией, литьем под давлением, пневмовакуум-формованием и другими методами.

Изделия из реактопластов (термореактивных полимеров) получают формоустойчивость в результате химической реакции сшивки – образования трехмерной «сшитой» структуры макромолекул. Процесс образования трехмерной структуры реактопласта принято называть отверждением. При этом реактопласты теряют способность вновь переходить в вязкотекучее состояние и поэтому при получении изделий реактопласты перерабатываются (отверждаются) однократно. К реактопластам относят и реакционноспособные олигомеры, чаще всего фенолоформальдегидные олигомеры – ФФО, аминокформальдегидные олигомеры – АФО и эпоксидные олигомеры, простые и сложные полиэферы, углеводородные олигомеры с концевыми функциональными группами, отверждающиеся при нагревании или без него. Реактопласты перерабатывают в изделия традиционными методами: прессованием, литьевым прессованием, литьем под давлением. Интенсивно развивается метод формования реакционноспособных олигомеров в «жидкой фазе», объединяющий в одной стадии процессы подготовки материала, формования и отверждения изделия (реакционно-инжекционное формование – RIM).

Полимерной основой большой группы композиционных материалов являются эластомеры, т.е. высокомолекулярные полимеры с низкой (ниже комнатной) температурой перехода из стеклообразного или кристаллического состояния в высокоэластическое и также обладающие способностью к сшиванию макромолекул посредством поперечных мостичных связей с образованием сетчатой структуры. К ним относятся изопреновые, бутадиеновые, хлоропеновые каучуки, бутилкаучук, фторкаучук и др. Химический процесс «сшивки» макромолекул эластомеров (каучуков) традиционно называется вулканизацией. В результате вулканизации пластичный эластомер или композиция на его основе необратимо превращается в прочную высокоэластичную резину, способную легко деформироваться под действием небольших нагрузок и восстанавливать свою форму после весьма значительных деформаций. Эластомеры (ПЭЛ) перерабатывают в изделия методами прессования, литья под давлением, экструзии, каландрования и другими.

В последние годы интенсивное развитие приобретает переработка термоэластопластов (ТЭП) – высокомолекулярных соединений, молекулы

которых образованы чередующимися блоками термопласта и ПЭЛ. Эти материалы при температуре ниже области плавления или стеклования блоков термопласта по свойствам подобны ПЭЛ, а при более высоких температурах они, как термопласты, обратимо переходят в вязкотекучее состояние, приобретая способность к формованию методами, применяемыми при переработке термопластов. Наиболее часто применяемые ТЭП – изопренстирольные и бутадиенстирольные каучуки, вальцуемые полиуретаны и др.

Данная классификация носит условный характер, т.к. существуют материалы, которые можно успешно перерабатывать в изделия большинством известных методов. При этом указание на то, что данный полимер может перерабатываться различными методами, подразумевает, как правило, что существует определенное количество марок полимера, значительно различающихся по технологическим характеристикам, например показателю текучести расплава.

Классификация по областям применения представляет собой выделение из множества полимерных материалов потребительских групп, включающих в себя материалы, сходные по определенному основному эксплуатационному признаку (свойству или совокупности близких свойств), являющемуся наиболее значимым и обязательным для данной области применения.

Можно выделить несколько таких групп. Среди них основными являются следующие.

- Пластмассы для работы под воздействием кратковременных или длительных статических нагрузок – конструкционные жесткие материалы. Основным признаком их является жесткость (модуль упругости не менее 900 МПа). К этой группе можно отнести ПА, поликарбонат (ПК), ПЭТ, полифениленоксид (ПФО), сополимеры формальдегида, пентапласт (ПТП), полиимиды (ПИ), этролы, армированный ПП, ненасыщенные полиэфирные олигомеры (НПО) армированные фенопласты, аминопласты, кремнийорганические композиции и др.
- Пластмассы для работы под воздействием ударных нагрузок - упругоподатливые, ударопрочные материалы. Ударная прочность пластмасс этой группы должна быть не ниже 20 кДж/м², в ряде случаев они должны обеспечивать значительные (в том числе обратимые) деформации. К этой группе можно отнести ПЭ, сополимеры этилена с пропиленом или винилацетатом, ПП, ПВХ, фторопласт, ПУ, ПА, ударопрочные сополимеры стирола, а также армированные пластики и др.
- Пластмассы, способные работать при повышенных (выше 150 °С) температурах, – теплостойкие материалы. К этой группе можно отнести ПА, ПЭТ, полифениленоксид (ПФО), ПК, полисульфон (ПСФ), пентапласт (ПТП), ПИ, фенопласты, аминопласты, кремнийорганические композиции и др.

- Пластмассы, способные работать при низких (ниже – 40°С) температурах, - морозостойкие материалы. К этой группе относят ПЭ, сополимеры этилена с пропиленом или винилацетатом, морозостойкие композиции ПП, фторопласты, ПА, ПК, сополимеры формальдегида, ПФО, ПСФ, ПЭТ, полиарамид (ПАР), ПИ и др.
- Пластмассы электро- и радиотехнического назначения. Эти материалы должны иметь высокие значения удельного объемного электрического сопротивления и малые величины тангенса угла диэлектрических потерь.
- Пластмассы для светотехники – прозрачные материалы. Значение коэффициента светопропускания материалов должно быть не ниже 80%. К ним можно отнести ПС, сополимеры стирола с нитрилом акриловой кислоты (САН) и (или) метилметакрилатом, полиакрилаты, прозрачные марки ПВХ и фторопластов, ПК, ПСФ, этролы, ПЭТ- и ПА- пленки, АФО и эпоксидные олигомеры, ненасыщенные полиэфирные олигомеры (НПО) и др.
- Пластмассы с пониженной горючестью – огнестойкие, самозатухающие материалы. К ним относятся материалы, имеющие, например, кислородный индекс горения более 22 % или не поддерживающие горения после вынесения их из пламени. К этой группе можно отнести фторопласты, ПИ, фурановые композиции, менее огнестойкие ПТП и ПВХ, а также огнестойкие композиции других полимеров.
- Пластмассы для работы под воздействием ионизирующих излучений – радиационностойкие материалы. К ним относят материалы, сохраняющие работоспособность при длительном воздействии ионизирующих излучений: фторопласты, ПАР, ПИ, композиции на основе эпоксидных и кремнийорганических олигомеров и др.
- Пластмассы для работы в агрессивных средах – химически стойкие материалы. Это ПЭ, ПП, ПВХ, фторопласты, ПТП, ПСФ, ПЭТ, ПИ, кремнийорганические композиции. Помимо полимеров с универсальной химической стойкостью выделяют группы водостойких, масло- и бензостойких, стойких к воздействию окружающей среды, тропикостойких, грибостойких и других пластмасс.
- Пластмассы для работы в контакте с пищевыми продуктами и питьевой водой – нетоксичные материалы. Применение пластмасс для этих целей требует разрешения для каждой новой детали, выдаваемого специализированными учреждениями на основе комплексного тестирования. К числу предпочтительных для этих целей относятся ПЭ, сополимеры этилена с винилацетатом, ПП, ПС и сополимеры стирола с другими мономерами (с малым содержанием остаточного мономера), ПВХ, фторопласты, ПУ, полиакрилаты, ПА, ПК, ПЭТ, ПСФ, ПВС, аминопласты и др. При соблюдении установленных дополнительных требований эти материалы можно применять также в медицине и медицинской технике.

Система классификации по совокупности параметров эксплуатации представляет собой деление множества пластмасс на две большие группы: общетехнического и инженерно-технического назначения.

Пластмассы общетехнического назначения имеют сравнительно низкие пределы текучести при растяжении, жесткость, твердость по Бринеллю (НВ) при обычной температуре и теплостойкость по Вика, что определяет резкое снижение их механических характеристик с повышением температуры. Пластмассы общетехнического назначения неработоспособны при кратковременной нагрузке при повышенной (выше 50 °С) температуре: они главным образом работают в ненагруженном или в слабонагруженном состоянии при обычных или средних (до 50 °С) температурах. Пластмассы общетехнического назначения имеют более низкие модули ползучести при обычной температуре, а также неработоспособны в условиях повышенных температур. При длительных нагрузках их применяют в малонагруженном состоянии при обычных температурах. Пластмассы общетехнического назначения могут иметь более высокие значения отдельных параметров, но по совокупности параметров эксплуатационных свойств они уступают пластмассам инженерно-технического назначения. Из таких материалов изготавливают ненагруженные изделия культурно-бытового, санитарно-гигиенического, медицинского и технического назначения, работающие при обычных температурах: пленки, трубы, профили, покрытия, уплотнительные детали, емкости, панели, корпусные детали, тару и т.п.

Пластмассы инженерно-технического назначения имеют более высокие механические характеристики и теплостойкость, что определяет меньшее снижение этих параметров с повышением температуры, поэтому пластмассы инженерно-технического назначения могут работать при кратковременной нагрузке при повышенных температурах. Они имеют достаточно высокие значения модулей ползучести при обычной и повышенной температурах и высокую температуру длительной эксплуатации под нагрузкой (выше 75 °С). Их можно применять для изготовления ответственных деталей, работающих при длительной нагрузке при повышенных температурах. Помимо указанных областей применения, характерных для пластмасс общетехнического назначения, инженерно-технические пластмассы могут использоваться для изготовления деталей машино- и приборостроения: шестерней, втулок, кулачков, направляющих рычагов, роликов, вкладышей подшипников, других деталей прецизионного характера, стерилизующихся деталей, печатных плат и т. д., – а также в строительстве.

По назначению пластмассы подразделяются на:

- общетехнические (ПЭ, ПП, ПС, ПВХи др.);

- инженерно-технические (ПА, ПК, поливинилацеталии др.);
- термоустойчивые и высокопрочные конструкционные (ПИ, ПАР и др.);
- пластмассы со специальными свойствами.

Соотношение групп в данной классификации 1000:100:10:1.

Важными характеристиками, определяющими возможность применения, являются тоннажность (объем) их производства и стоимость пластмасс.

Деление по объему производства включает в себя подразделение ПМ на крупнотоннажные, среднетоннажные и малотоннажные.

Промышленно выпускаемые ПМ условно можно разделить на крупнотоннажные полимеры с объемом мирового производства несколько десятков миллионов тонн, среднетоннажные полимеры с объемом производства несколько миллионов тонн и малотоннажные полимеры.

В первую группу входят такие ПМ общетехнического назначения, как ПЭ, ПП, ПВХ, ПС, включая сополимеры. Доля этих материалов достигает 80 % от общего объема производства пластмасс.

Во вторую группу входят основные инженерные ПМ (например, ПА). Следует отметить, что состав этих групп не является неизменным. Объемы производства могут значительно измениться в течение короткого периода времени. Так, с увеличением объема потребления ПЭТ за счет производства емкостей для розлива напитков в последние 10 лет объем его мирового производства резко возрос, что приблизило этот ПМ к группе крупнотоннажных ПМ. Другим примером является ПВХ, применение которого в настоящее время начинает сокращаться в развитых странах по экологическим причинам.

Учитывая опережающее развитие производства полимеров инженерно-технического назначения, в основном относящихся к группе среднетоннажных материалов, можно ожидать перехода ряда этих полимеров в группу крупнотоннажных.

На долю большинства оставшихся малотоннажных полимерных материалов (фторопласты, ПИ, кремнийорганические композиции) приходится лишь несколько процентов от общего объема производства.

Границы указанных выше групп условны и зависят от структуры производства в данный момент времени.

Несмотря на то, что рыночная цена ПМ определяется соотношением спроса и предложения, а также очень сильно зависит от цен на углеводородное сырье, соотношение цен различных полимеров достаточно жестко связано с соотношением объемов их производства. Так, наибольшая

ценовая доступность характерна именно для крупнотоннажных ПМ (минимальные цены от 1000 долл./тонну). Для среднетоннажных ПМ характерны цены от 10000 долл./тонну. Цены на малотоннажные ПМ могут превышать 100000 долл./тонну.

По форме макромолекул полимеры делят на линейные, разветвленные, плоские, ленточные, пространственные или сетчатые (рис. 1).

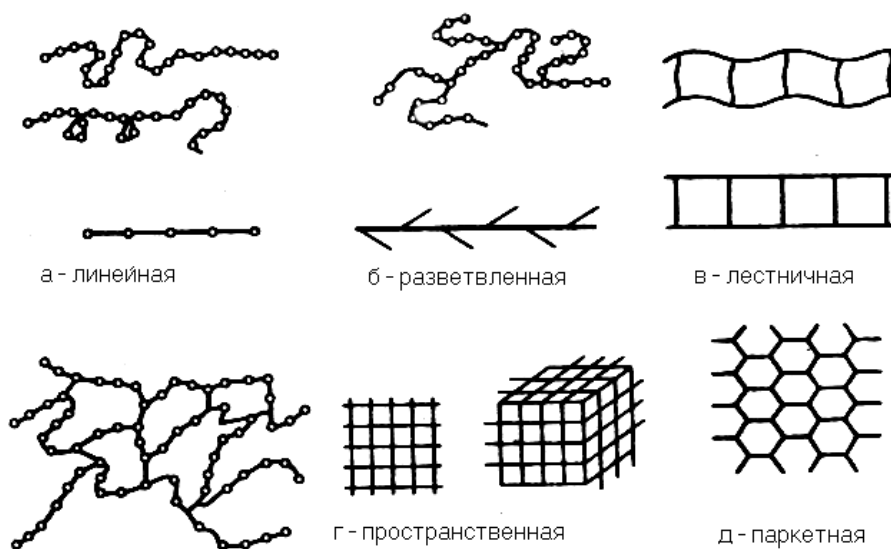


Рис. 1 – Форма макромолекул полимеров

По фазовому состоянию полимеры подразделяют на аморфные и кристаллические.

Аморфные полимеры однофазны и построены из цепных молекул, собранных в пачки. Пачка состоит из многих рядов макромолекул, расположенных последовательно друг за другом. Пачки способны перемещаться относительно соседних элементов, так как они являются структурными элементами (рис. 2).

Некоторые аморфные полимеры могут быть также построены из свернутых в клубки цепей, так называемых глобул. Такая структура дает невысокие механические свойства, но при повышении температуры они разворачиваются в ленты, способствующие повышению их механических свойств. Надмолекулярные структуры в этих полимерах флуктуационны, термодинамически нестабильны и характеризуются относительно небольшим временем жизни.

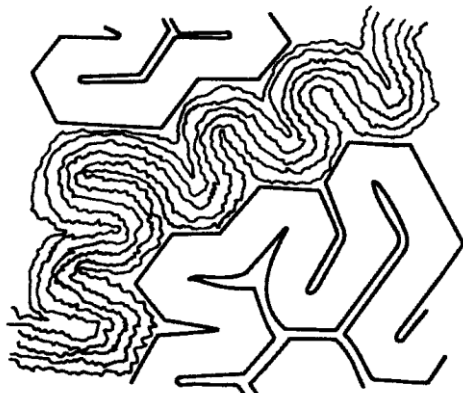


Рис. 2 – Модель аморфного полимера с высокой организацией макромолекул в гибкие пучки (Печхольд)

Кристаллические полимеры образуются в том случае, если их макромолекулы достаточно гибкие и имеют регулярную структуру. Кристаллические структуры являются дискретными, организованными, термодинамически стабильными. Кристалличность сообщает полимеру большую жесткость и твердость, а также теплостойкость. В полимере после кристаллизации всегда сохраняются области с неупорядоченной, аморфной структурой. Поэтому полимеры иногда называют частично кристаллическими. Наличие аморфной фазы — одна из особенностей кристаллического состояния полимеров. Молекулярные цепи в кристаллизующихся полимерах имеют складчатую конформацию, для которой характерно проявление регулярно повторяющихся изгибов (складок) из выпрямленных отрезков цепей, расположенных на одинаковом расстоянии и параллельно друг другу (рис. 3).

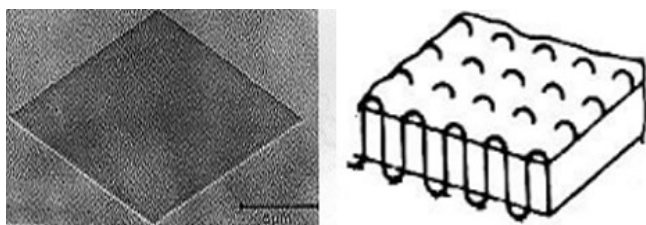


Рис. 3 – Монокристалл полиэтилена и его строение. Складчатая конформация. [микрофотография из Sperling L.H. Introduction to Physical Polymer Science, Wiley, 2006]

Образующаяся при этом кристаллографическая элементарная ячейка кристаллического полимера мала, каждая макромолекула может проходить через несколько элементарных ячеек.

Кристаллические области в полимерах характеризуются трехмерным дальним порядком в расположении одновременно звеньев и цепей макромолекул. Это состояние отличается анизотропией свойств, скачками свойств на границе раздела фаз.

По полярности полимеры подразделяются на полярные и неполярные. Полярность определяется наличием в их составе диполей - разобщенных центров распределения положительных и отрицательных зарядов. Первым условием полярности является присутствие в полимере полярных связей (группировок -Cl, -F, -OH), вторым несимметрия в их структуре. В неполярных полимерах дипольные моменты связей атомов взаимно компенсируются. Неполярные полимеры (на основе углеводов) являются высококачественными высокочастотными диэлектриками, они обладают хорошей морозостойкостью. Полярность сообщает полимерам жесткость, теплостойкость, но морозостойкость у полярных материалов низкая.

Все полимеры по отношению к нагреву подразделяют на *термопластичные и термореактивные*.

Термопластичные полимеры при нагреве размягчаются, даже плавятся, при охлаждении затвердевают; этот процесс обратим, Структура макромолекул таких полимеров линейная и разветвленная.

Термореактивные полимеры на первой стадии образования имеют линейную структуру и при нагреве размягчаются, затем вследствие протекания химических реакций затвердевают (образуется пространственная структура) и в дальнейшем остаются твердыми. Отвержденное состояние полимера называется термостабильным.

Особенности строения полимеров оказывают большое влияние на их физико-механические и химические свойства. Вследствие высокой молекулярной массы они не способны переходить в газовое состояние, при нагреве образовывать низковязкие жидкости, а термостабильные даже не размягчаются.

Механические свойства полимеров зависят от их структуры, физического состояния и температуры. Полимеры могут находиться в трех физических состояниях: стеклообразном, высокоэластичном и вязкотекучем.

ОСНОВЫ РЕОЛОГИИ РАСПЛАВОВ ПОЛИМЕРОВ

Для полимеров типичны твердое и жидкое агрегатные состояния, характеризующиеся колебательным и вращательным движением частиц и небольшими расстояниями между частицами. В газообразном состоянии полимеры не бывают, т.к. для того, чтобы раздвинуть макромолекулы на большие расстояния, необходимо преодолеть сильные межмолекулярные взаимодействия цепных макромолекул, требующие энергий, сравнимых с энергиями химических связей в полимерной цепи, т.е. произойдет деструкция полимера.

При нагревании полимеров на температурное воздействие в первую очередь реагируют сегменты макромолекул. С увеличением температуры потенциальная энергия сегментов растет и, достигнув величины энергии межмолекулярного взаимодействия, приводит к разрыву существующих межмолекулярных связей. Постепенно такой процесс при непрерывном подведении к полимеру тепла происходит вдоль всей молекулы. Молекулы начинают перемещаться друг относительно друга, т.е. полимер начинает течь. Следовательно, чем чаще и прочнее межмолекулярные связи в полимере, тем большую внешнюю энергию нужно приложить к полимеру для того, чтобы преодолеть энергию межмолекулярного взаимодействия в нем.

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ДЕФОРМАЦИИ

Все полимерные материалы в определенном температурном интервале способны к большим необратимым деформациям – пластическому течению. Для линейных аморфных полимеров этот температурный интервал – по существу вся область температур, лежащая выше температуры стеклования. Для кристаллических полимеров – это область выше температуры плавления. Разумеется, в обоих случаях сверху эта область ограничивается температурой разложения (для термопластичных материалов) и температурой структурирования для терморезистивных или вулканизирующихся материалов.

Всякую конечную деформацию реального материала можно представить как результат последовательного проявления двух принципиально отличных видов деформации: деформации объемного сжатия или расширения, характеризующей изменение объема при неизменной форме, и деформации сдвига, характеризующей изменение формы при неизменном объеме.

Взаимное соотношение этих двух видов деформации реальных материалов определяется физической константой материала, называемой коэффициентом Пуассона.

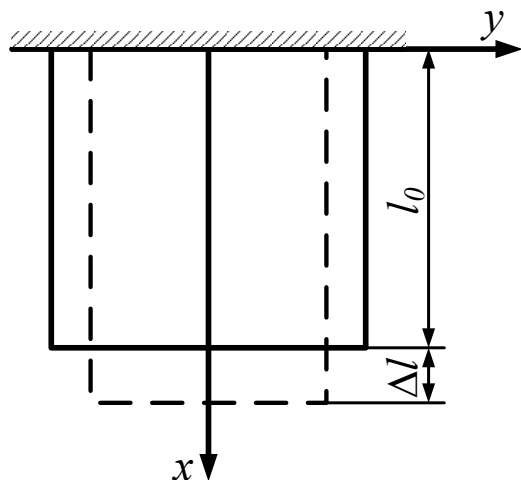


Рис. 4 – Растяжение прямоугольной призмы

Рассмотрим призму длиной l_0 , к торцу которой приложено растягивающее напряжение σ_0 (рис. 4). Предположим, что материал призмы подчиняется закону Гука. В этом случае под действием напряжения σ_0 призма удлинится на величину Δl . Величина относительного удлинения $\varepsilon_{xx} = \Delta l / l_0$ определится при этом соотношением:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\sigma_0}{E}$$

где E – модуль упругости первого рода, или модуль Юнга, равный напряжению, при котором длина растягиваемого образца удваивается.

Одновременно уменьшится поперечное сечение призмы:

$$\varepsilon_{yy} = -\mu \cdot \frac{\sigma_0}{E}$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Величина относительного изменения объема будет равна:

$$\frac{\Delta V}{V} = (1 - 2\mu) \cdot \frac{\sigma_0}{E}$$

Для всех полимерных систем при температурах выше температуры стеклования (или плавления) величина коэффициента Пуассона близка к 0,5.

Поэтому во всех случаях деформация полимерных тел может быть сведена к изменению формы, т.е. к деформации сдвига.

УПРУГАЯ И ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

Деформацией называют относительное перемещение частиц тела при сохранении его непрерывности. Деформация материалов может быть упругой, высокоэластической и пластической. Жесткие материалы, например сталь, обладают упругой деформацией, подчиняющейся закону Гука.

Рассмотрим деформацию элементарной призмы, к верхней и нижней поверхностям которой приложена тангенциальная сила F (рис. 5).

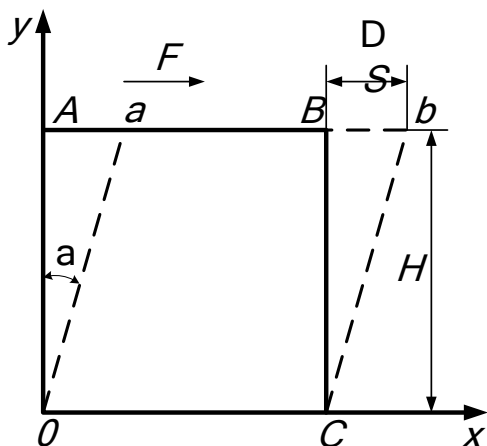


Рисунок 5 – Сдвиг прямоугольной призмы

Верхняя плоскость под действием силы F сместится на величину ΔS . Величина ΔS называется смещением. Опыт показывает, что чем больше F , чем меньше A (площадь грани AB) и чем больше высота призмы H , тем больше величина смещения ΔS .

Для призмы из абсолютно упругого материала справедливо следующее соотношение:

$$\frac{\Delta S}{H} = \frac{F}{A} \cdot \frac{1}{G} \quad (1)$$

Величина $\frac{\Delta S}{H}$ служит мерой деформации сдвига и равна $\operatorname{tg} \alpha$, а при малых значениях угла α – самому углу. Угол α определяет уменьшение прямого угла

между основанием и боковыми гранями призмы. В дальнейшем деформация сдвига будет обозначаться буквой γ .

Величина $\frac{F}{A}$, – это тангенциальное напряжение или напряжение сдвига, которое обозначается в дальнейшем буквой τ .

И наконец, величина G – это мера упругости тела, так называемый модуль упругости при сдвиге или модуль сдвига. Таким образом, уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$\gamma = \frac{\tau}{G}. \quad (2)$$

Это уравнение известно как закон Гука, который гласит: «величина деформации упругого тела пропорциональна величине действующих напряжений и обратно пропорциональна модулю упругости тела». Графически закон Гука можно изобразить в виде линии, иллюстрирующей прямую пропорциональность между напряжением и деформацией (рис. 5).

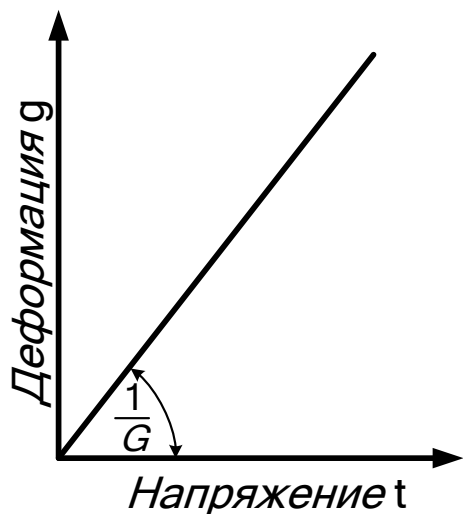


Рис. 5 – Графическое представление закона Гука

Упругая деформация происходит почти мгновенно вслед за приложением силы и имеет незначительную величину, так как уже при небольшой деформации, порядка 1 %, образец разрушается.

Все виды упругой деформации характеризуются тем, что по снятии внешнего усилия деформация исчезает и тело возвращается к первоначальной форме за счет энергии, приданной телу при деформации

Эластичные тела, например резина, также обладают упругой деформацией, но соотношение между величинами усилия и деформации носит совершенно другой характер: небольшие усилия вызывают значительное удлинение образца. Модуль упругости для резины составляет около 20 кг/см^2 . Такая деформация называется высокоэластической.

При растягивании высокоэластичных материалов они значительно удлиняются, что связано с выпрямлением свернутых цепей. Высокоэластическая деформация обратима. После снятия нагрузки образец восстанавливает начальную длину, так как растянутые цепи снова свертываются.

Если призма сделана из пластичного материала, ее поведение будет несколько иным. Вначале, пока напряжения очень малы, она будет вести себя подобно призме из упругого материала. Однако с того момента, когда напряжения достигнут определенного значения, называемого пределом текучести τ_T , дальнейшее увеличение деформации уже не будет требовать увеличения напряжений. Графическое выражение закона деформации пластичного материала приведено на рис. 6.

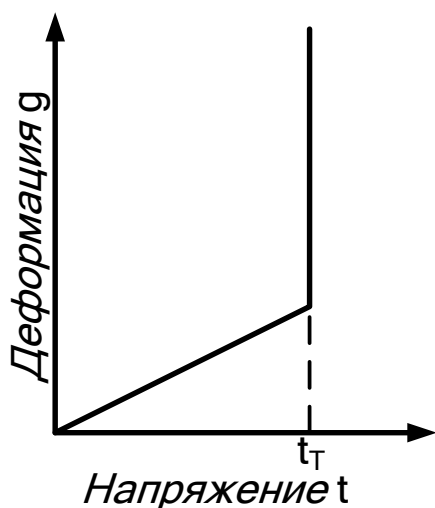


Рис. 6 – График деформации пластичного материала

Пластической называется необратимая деформация, сохраняющаяся и после удаления внешних усилий. Пластическая деформация характеризуется тем, что под влиянием внешних усилий изменяется взаимное расположение частиц тела без изменения энергии системы. Поэтому новое расположение частиц сохраняется после снятия напряжения.

Практически пластической деформации сопутствует высокоэластическая, которая медленно исчезает после снятия нагрузки, что создает видимость пластической деформации. Например, если растянуть полоску резины, то после удаления растягивающей силы полоска сократится, но не до прежней длины, т. е. наблюдается остаточная деформация. Однако если полоску нагреть, то она примет прежнюю длину – остаточное удлинение носило характер высокоэластической деформации, и повышение температуры сократило время релаксации. Это имеет большое практическое значение, так как сформованная деталь может значительно деформироваться при повышении температуры или же просто со временем. Поэтому важно уметь различать, какая часть наблюдаемой деформации является пластической, т. е. необратимой, а какая должна быть отнесена к высокоэластической. Наиболее точным (хотя и сложным) способом определения типа деформации является сравнение молекулярной структуры до и после деформации; если молекулярная структура не изменилась – деформация является пластической.

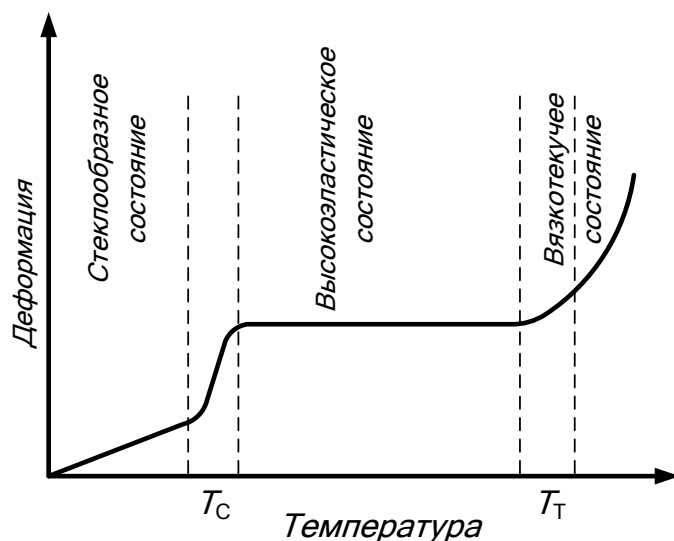


Рис. 7 – Термомеханическая кривая аморфного полимера

Из диаграммы для аморфного полимера (рис. 7) видно, что в низшем температурном интервале вещество находится в стеклообразном состоянии, т. е. деформация мала и увеличивается пропорционально температуре. Выше температуры стеклования T_C вещество переходит в высокоэластическое состояние, характеризующееся резким увеличением деформации, а выше температуры текучести T_T вещество становится вязкотекучим или пластическим.

Термомеханические кривые для кристаллических полимеров имеют иной, чем для аморфных полимеров, вид – для сравнительно низкомолекулярных полимеров высокоэластическое состояние отсутствует, причем полимер переходит из кристаллического состояния непосредственно в вязкотекучее.

На рис. 8, показаны термомеханические кривые кристаллических полимеров. До температуры плавления деформации полимера малы. После достижения температуры плавления полимер переходит в высокоэластическое состояние (кривая 1 на рис. 8). Плавление кристаллических полимеров происходит в определенном температурном интервале, что объясняется наличием в полимере кристаллов различных размеров: маленькие кристаллы плавятся при более низких температурах, чем большие.

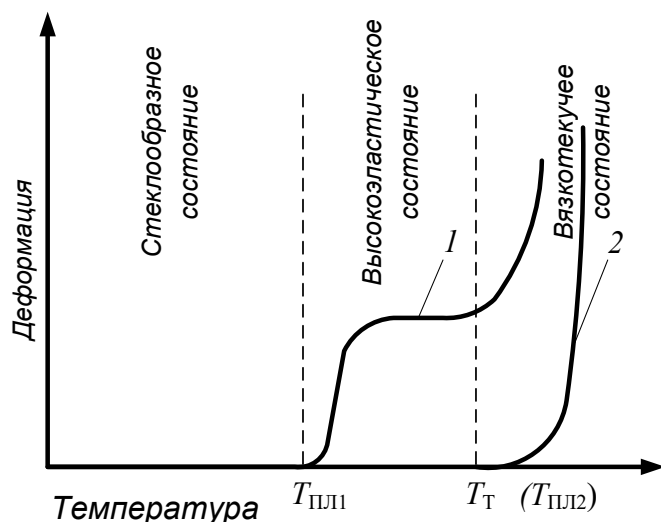


Рис. 8 – Термомеханические кривые кристаллических полимеров

При дальнейшем нагревании полимер переходит в вязкотекучее состояние. Однако кристаллический полимер может сразу перейти в

вязкотекучее состояние (кривая 2 на рис. 8). Температура плавления кристаллического полимера так же, как и низкомолекулярных веществ, зависит от энергии межмолекулярного взаимодействия, возрастая с ее увеличением. Наличие в молекуле двойных связей, ароматических колец, больших боковых групп затрудняет подвижность молекулы и вызывает повышение температуры плавления. Например, температура плавления полипропилена с неполярными $-CH_3$ группами равна 160...170 °С, для полиамидов с полярными CONH группами 220...250 °С, а полиэтилентерефталата – 255 °С.

Область высокоэластического состояния является очень важной для переработки термопластов в связи с возможностью получения больших деформаций при небольших напряжениях. Это позволяет использовать простые методы переработки, при которых развиваются небольшие усилия (вакуумное формование листов, раздувание цилиндрических заготовок при получении пленки или полых изделий). В то же время сопротивление деформации в высокоэластическом состоянии достаточно высоко, материал хорошо сохраняет форму, поэтому при переработке не требуется применения внешних опор, за исключением тех мест, где деформация должна быть исключена с целью ограничения размеров изделия.

Не все линейные полимеры могут существовать во всех физических состояниях. Для сильнополярных макромолекул взаимодействие может быть так велико, что полимер при нагревании разлагается раньше перехода в высокоэластическое состояние (например, целлюлоза) или переходит в высокоэластическое состояние. В последнем случае полимер разлагается не переходя в вязкотекучее состояние.

Термомеханические кривые для структурирующихся полимеров имеют иной вид, чем для линейных несшивающихся полимеров. Появление сшивок переводит вязкотекучий полимер в высокоэластическое, а затем в стеклообразное состояние.

Температура, охлаждаясь до которой вещество теряет свойство эластичности и разрушается при быстрых нагрузках, называется температурой хрупкости. Для практического применения материалов в условиях быстропеременных нагрузок температура хрупкости является очень важным показателем.

Полная деформация полимера складывается, таким образом, из упругой, высокоэластической и пластической деформаций.

ЭКСТРУЗИЯ КАК БАЗОВЫЙ ПРОЦЕСС ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Экструзия – метод формования в экструдере изделий или полуфабрикатов неограниченной длины продавливанием расплава полимера через формующую головку с каналами необходимого профиля. Для этого используют шнековые, или червячные, экструдеры.

Производство различных видов изделий методом экструзии осуществляется путем подготовки расплава в экструдере и придания экструдату той или иной формы посредством продавливания его через формующие головки соответствующей конструкции с последующими охлаждением, калиброванием и т.д.

Основным оборудованием для переработки пластмасс методом экструзии служат шнековые машины, называемые также червячными прессами.

Наиболее простым является одношнековый экструдер без зоны дегазации (рис. 9). Основными элементами экструдера являются обогреваемый цилиндр, шнек (с охлаждением или без него), сетки, размещаемые на решетке, и формующая головка.

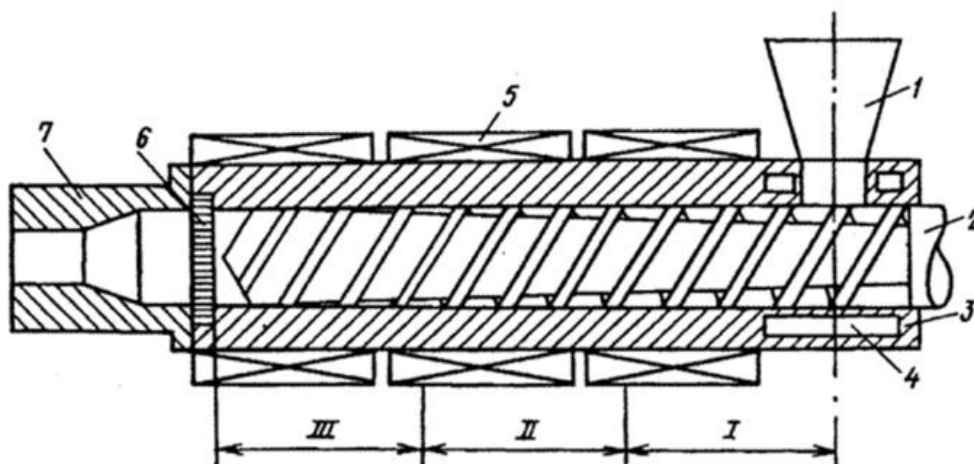


Рис. 9 – Схема одношнекового экструдера: 1 – бункер; 2 – шнек; 3 – цилиндр; 4 – полость для циркуляции воды; 5 – нагреватель; 6 – решетка с сетками; 7 – формующая головка; I, II, III – технологические зоны

Технологический процесс экструзии складывается из последовательного перемещения материала вращающимся шнеком в его зонах (рис. 9) питания

(I), пластикации (II), дозирования расплава (III), а затем продвижения расплава в каналах формирующей головки.

Рассмотрим поведение материала последовательно на каждом этапе экструзии.

Зона питания. Поступающие из бункера гранулы заполняют межвитковое пространство шнека зоны I и уплотняются. Уплотнение и сжатие гранул в зоне I происходит, как правило, за счет уменьшения глубины нарезки h шнека. Продвижение гранул осуществляется вследствие разности значений силы трения полимера о внутреннюю поверхность корпуса цилиндра и о поверхность шнека. Поскольку поверхность контакта полимера с поверхностью шнека больше, чем с поверхностью цилиндра, необходимо уменьшить коэффициент трения полимера о шнек, так как в противном случае материал перестанет двигаться вдоль оси шнека, а начнет вращаться вместе с ним. Это достигается повышением температуры стенки цилиндра (нагревом) и понижением температуры шнека (охлаждением водой в зоне I). В зоне I вследствие большого внешнего и внутреннего трения выделяется тепло, которое также расходуется на нагрев материала. В эту же зону подается тепло от нагревателей, расположенных по периметру цилиндра.

При оптимальной температуре полимер спрессован, уплотнен и образует в межвитковом пространстве твердую пробку. Лучше всего, если такая скользящая пробка образуется и сохраняется на границе зон I и II. Свойства пробки во многом определяют производительность машины, стабильность транспортировки полимера, величину максимального давления и т.д.

Зона пластикации и плавления. В начале зоны II происходит подплавление полимера, примыкающего к поверхности цилиндра. Расплав постепенно накапливается и воздействует на убывающую по ширине пробку (рис. 10). Поскольку глубина нарезки шнека уменьшается по мере продвижения материала от зоны I к зоне III, то возникающее давление заставляет пробку плотно прижиматься к горячей стенке цилиндра, где и происходит плавление полимера.

В зоне пластикации пробка плавится также и под действием тепла, выделяющегося вследствие внутреннего, вязкого трения в материале в тонком слое расплава (поз. 3 на рис. 28), где происходят интенсивные сдвиговые деформации, – материал пластицируется. Последнее обстоятельство приводит к выраженному смесительному эффекту. Расплав

интенсивно гомогенизируется, а составляющие композиционного материала перемешиваются.

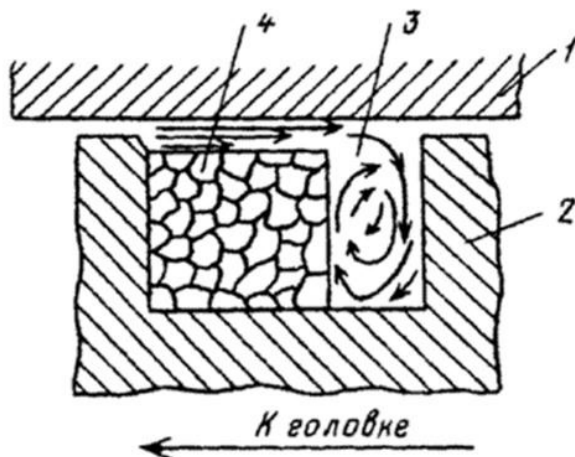


Рис. 10 – Схема плавления пробки материала в зоне II в межвитковом сечении шнека: 1 – стенки цилиндра; 2 – гребень шнека; 3 – потоки расплава полимера; 4 – спрессованный твердый полимер (пробка) в экструдере

Конец зоны II характеризуется распадом пробки на отдельные фрагменты. Далее расплав полимера с остатками твердых частиц попадает в зону дозирования.

Зона дозирования. Продвижение гетерогенного материала (расплав, частички твердого полимера) продолжает сопровождаться выделением внутреннего тепла, которое является результатом интенсивных сдвиговых деформаций в полимере. Расплавленная масса продолжает гомогенизироваться, что проявляется в окончательном плавлении остатков твердого полимера, усреднении вязкости и температуры расплавленной части.

Уменьшающаяся глубина нарезки шнека создает давление, которое необходимо для продавливания расплава через фильтрующие сетки, подачи его в головку, уплотнения и в итоге – для выхода сформованного изделия. После прохождения сеток гомогенизированный расплав под остаточным давлением ($P = 5,0...35$ МПа) продавливается в формирующую оснастку и, приобретая определенный профиль, выходит практически под очень небольшим избыточным давлением из фильерной части головки.



Рис. 11 – Экструзионная линия для производства филамента

Именно таким способом готовится филамент, используемый впоследствии для изготовления изделий с помощью аддитивных технологий, в частности FDM-печати (рис. 11).

ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

FDM — МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННОЙ НИТИ

FDM (Fused Deposition Modelling) — технология трехмерной печати, при которой построение объекта идет за счет расплавления нити пластика, которая через экструдер подается на рабочую поверхность. Технология была изобретена в конце 80-х годов Скотом Краппом, который позже запатентовал ее и основал компанию Stratasys.

Согласно классификации американской ассоциации по разработке техстандартов (ASTM), эта технология относится к одной большой группе — Material extrusion, что переводится как «выдавливание материала», а сама аббревиатура FDM означает «осаждение расплавленного материала». Рассмотрим подробнее весь процесс.

Чтобы осуществить FDM-печать необходимо иметь 3D-модель нужного изделия в формате STL. Это специальный формат, в котором модель порезана на тончайшие слои, каждая точка которых имеет известные координаты. Для печати всей модели на принтер сначала передаются данные о форме первого слоя, после чего устройство начинает выдавливать в строго заданных местах расплавленный пластик. Сегодня FDM-технология может обеспечить толщину слоя в 0,02-0,05 мм. После нанесения пластика экструдер отдалается от модели эту толщину и весь процесс повторяется.

Источником материала обычно служит катушка с намотанной пластиковой нитью – филаментом. Через головку и специальное сопло (рис. 12) нить подается на платформу, создавая твердое тело будущей модели. Микропроцессор включает или выключает подачу материала, а также управляет движением головки в пространстве по трем координатам.

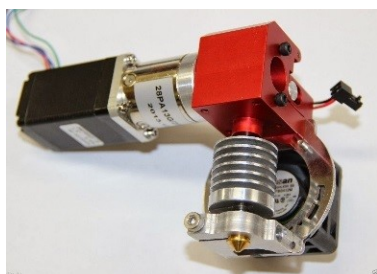


Рис. 12 – Экструзионные головки различных FDM-принтеров

Технология FDM печати заключается в следующем: экструзионная головка с контролируемой температурой разогревает до полужидкого состояния полимерную нить, и с высокой точностью подает полученный термопластичный моделирующий материал тонкими слоями на рабочую поверхность 3D принтера. Слои наносятся друг на друга, соединяются между собой и затвердевают, постепенно формируя готовое изделие.

FDM 3D печать — наиболее распространенная и доступная технология — послойное нанесение расплава полимера.

Основным конструктивным элементом FDM-3D-принтера является печатающая головка (рис. 13), которая состоит из устройства подачи филамента и нагревателя. Устройство подачи филамента – это механизм, который дозированно подает полимерную нить в нагреватель. Нагреватель — это такая часть печатающей головки, в которой полимерная нить расплавляется и выдавливается через крошечное сопло диаметром 0,15–0,50 мм. Нагреватель с соплом часто называют *hot-end* (горячий конец), а устройство подачи филамента по аналогии *cold-end* (холодный конец).

Для подачи полимерных нитей в печатающую головку используется шаговый двигатель с системой шестерен и валов. Контроллер, управляющий двигателем, обеспечивает необходимую скорость подачи нитей, а также их изъятие при изменении материала. Температура нагревателя печатающей головки контролируется термистором.

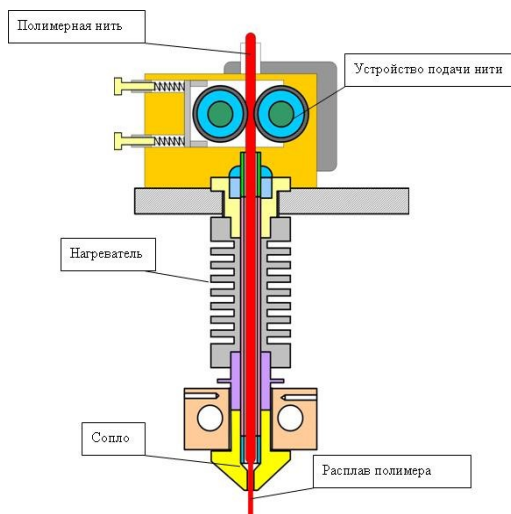


Рис. 13 – устройство экструзионной головки FDM-принтера

Важнейший аспект – размер сопла экструдера. Именно от него зависит, в большой степени, качество печати. Производители 3D-принтеров обычно оснащают свои экструдеры соплами с отверстием диаметром 0,4–0,5 мм – этот размер является оптимальным. В свою очередь, использование сопла меньшего диаметра (0,2–0,3 мм) может обеспечить лучшую детализацию, четкость граней и чистоту поверхности объекта, так как выдавливаются более тонкие нити расплава пластика.

Изделие при FDM-печати создается послойно. Для изготовления очередного слоя термопластичный материал нагревается в печатающей головке до полужидкого состояния и выдавливается в виде нити через сопло с отверстием малого диаметра, оседая на поверхности рабочего стола (для первого слоя) или на предыдущем слое, соединяясь с ним. Головка перемещается в горизонтальной плоскости и постепенно «рисует» нужный слой – контуры и заполнение между ними, после чего происходит вертикальное перемещение (чаще всего опусканием стола, но есть модели, в которых приподнимается головка) на толщину слоя и процесс повторяется до тех пор, пока модель не будет построена полностью.

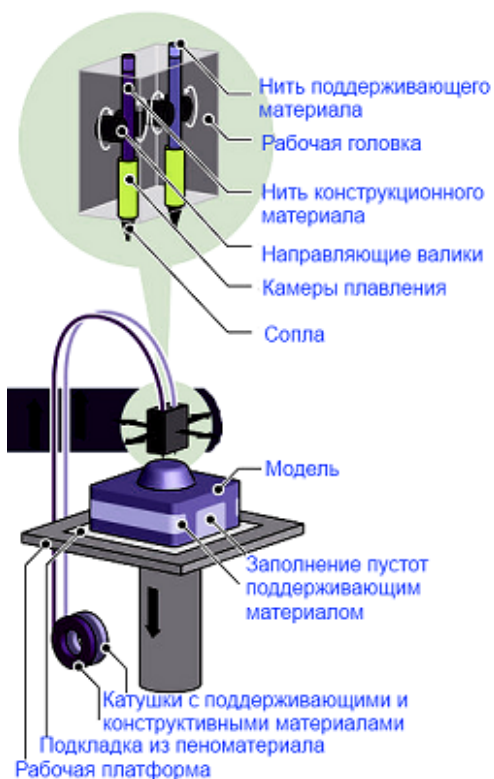


Рис. 14 – Принцип 3D-печати по FDM-технологии

Слои наносятся друг на друга, соединяются между собой и отвердевают, постепенно формируя готовое изделие. Исходными данными при этом являются пространственно-математические модели, созданные с применением современных средств САПР в формате STL. Возможна их трансляция из форматов IGS, SAT, STEP, SLDPRТ и некоторых других. На рис. 14 показан принцип FDM печати.

На рис. 15 изображена модель, напечатанная 3D принтером с технологией FDM печати.



Рис. 15 – Модель, напечатанная 3D принтером с технологией FDM печати

FDM-технология позволяет создавать концептуальные модели, функциональные прототипы и готовые изделия из стандартных, конструкционных и суперконструкционных термопластов. Это единственная профессиональная технология 3D-печати, которая работает с термопластами промышленного класса, так что модели обладают непревзойденными механическими, термическими и химическими характеристиками.

В FDM-технологии часто используют два материала для выполнения печати: моделирующий материал, который используется для изготовления конечных изделий, и материал поддержки, который выступает в качестве опоры. Нить материала подается из отсека материала на печатающую головку 3D-принтера, которая перемещается по координатам X и Y, укладывая материал для завершения каждого слоя и до перемещения основы по оси Z вниз и начала следующего слоя (рис. 14).

После того, как 3D-принтер завершил модель, необходимо удалить поддерживающий материал или растворить его детергентом и водой, после чего деталь готова к использованию.

Экструдер (рис. 16) – печатная головка FDM-принтера. Строго говоря, это не совсем верно, ибо головка состоит из нескольких частей, из которых непосредственно «экструдером» является лишь подающий механизм. Тем не менее, по устоявшейся традиции термин «экструдер» повсеместно применяется в качестве синонима целой печатающей сборки.

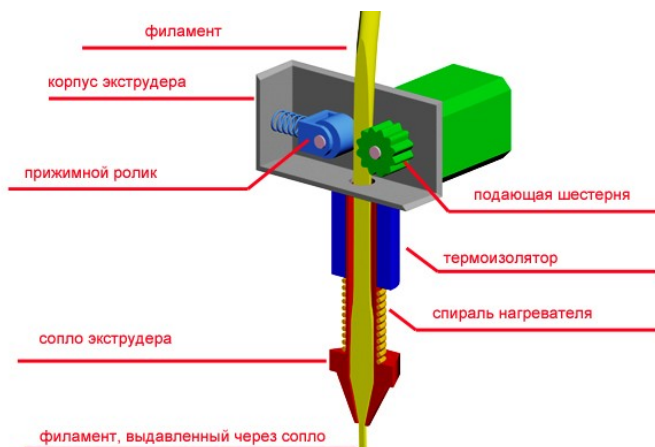


Рис. 16 – Общая схема конструкции FDM-экструдера

Экструдер предназначен для плавки и нанесения термопластиковой нити. Первый компонент – механизм подачи нити, состоящий из валиков и шестерней, приводимых в движение электромотором. Механизм осуществляет подачу нити в специальную нагреваемую металлическую трубку с соплом небольшого диаметра, называемую «хот-энд» или просто «сопло». Тот же механизм используется и для извлечения нити, если необходима смена материала.

Хот-энд служит для нагревания и плавления нити, подаваемой протягивающим механизмом. Как правило, сопла производятся из латуни или алюминия, хотя возможно использование более термоустойчивых, но и более дорогих материалов. Для печати наиболее популярными пластиками вполне достаточно и латунного сопла. Собственно «сопло» крепится к концу трубки с помощью резьбового соединения и может быть заменено на новое в случае износа или при необходимости смены диаметра. Диаметр сопла обуславливает толщину расплавленной нити и, как следствие, влияет на разрешение печати. Нагревание хот-энда регулируется термистором.

Регулировка температуры очень важна, так при перегреве материала может произойти пиролиз, то есть разложение пластика, что способствует как потере свойств самого материала, так и забиванию сопла.

Для того чтобы нить не расплавилась слишком рано, верхняя часть хот-энда охлаждается с помощью радиаторов и вентиляторов. Этот момент имеет огромное значение, так как термопластики, проходящие порог температуры стеклования, значительно расширяются в объеме и повышают трение материала со стенками хот-энда. Если длина такого участка слишком велика, протягивающему механизму может не хватить сил для проталкивания нити.

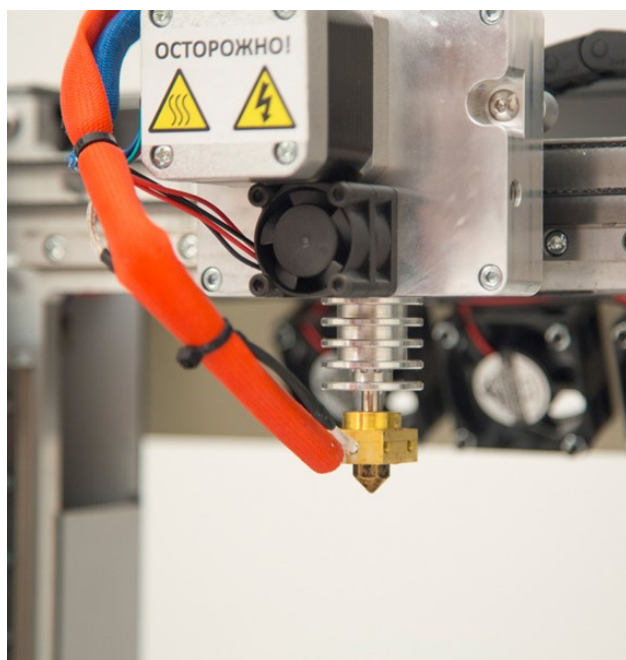


Рис. 17 – Экструдер FDM-принтера PrintBox3D One

Количество экструдеров может варьироваться в зависимости от предназначения 3D-принтера. Простейшие варианты используют одну печатающую головку (рис. 17).

Двойной экструдер значительно расширяет возможности устройства, позволяя печатать одну модель двумя разными цветами, а также использовать разные материалы. Последний момент важен при построении сложных моделей с нависающими элементами конструкции: FDM-принтеры не могут печатать «по воздуху», так как наносимым слоям требуется опора.

В случае с навесными элементами приходится печатать временные опорные структуры, которые удаляются по завершении печати. Процесс удаления чреват повреждением самой модели и требует аккуратности. Кроме того, если модель имеет сложную структуру с труднодоступными внутренними полостями, построение обычных опор может оказаться непрактичным ввиду сложности удаления лишнего материала (рис. 18).

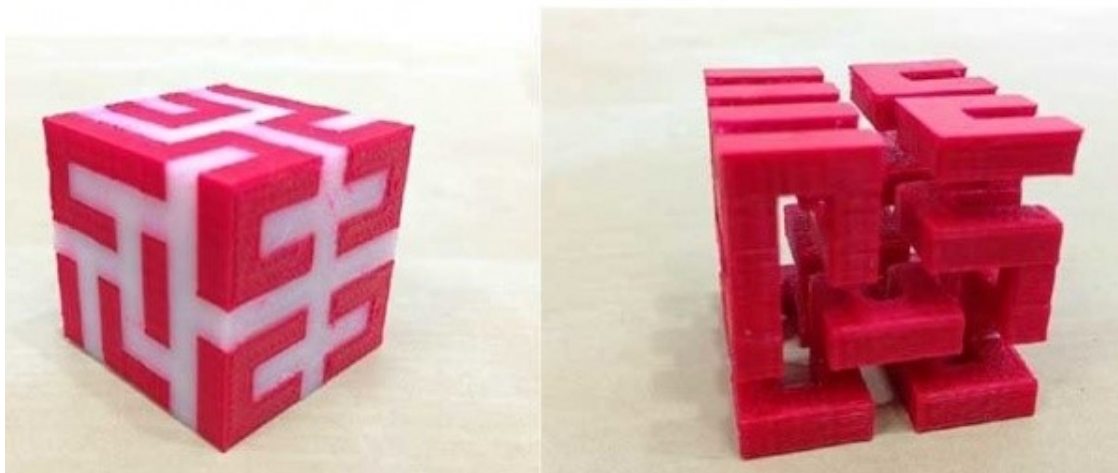


Рис. 18 – Готовая модель с опорами из PVA-пластика (белого цвета) до и после промывки

В таких случаях весьма кстати приходится тот самый водорастворимый поливиниловый спирт (PVA-пластик). С помощью двойного экструдера можно построить модель из водоупорного термопластика, используя PVA для создания опор. После окончания печати PVA можно просто растворить в воде и получить сложное изделие идеального качества.

Некоторые модели FDM-принтеров могут использовать три или даже четыре экструдера.

РАБОЧАЯ ПЛАТФОРМА

Построение моделей происходит на специальной платформе, зачастую оснащаемой нагревательными элементами. Подогрев требуется для работы с целым рядом пластиков, включая популярный АБС-пластик, подверженных высокой степени усадки при охлаждении. Быстрая потеря объема холодными слоями в сравнении со свеженанесенным материалом может привести к

деформации модели или расслоению. Подогрев платформы позволяет значительно выравнять градиент температур между верхними и нижними слоями (рис. 18).



Рис. 18 – Подогреваемая платформа, накрытая съемным стеклянным рабочим столиком

Для некоторых материалов подогрев противопоказан. Характерный пример – PLA-пластик, который требует достаточно длительного времени для затвердевания. Подогрев PLA может привести к деформации нижних слоев под тяжестью верхних. При работе с PLA обычно принимаются меры не для подогрева, а для охлаждения модели. Такие принтеры имеют характерные открытые корпуса и дополнительные вентиляторы, обдувающие свежие слои модели.

Платформа требует калибровки перед печатью, чтобы сопло не задевало нанесенные слои и не отходило слишком далеко, вызывая печать «по воздуху», что приводит к образованию «вермишели» из пластика. Процесс калибровки может быть как ручным, так и автоматическим. В ручном режиме калибровка производится позиционированием сопла в разных точках платформы и регулировкой наклона платформы с помощью опорных винтов

для достижения оптимальной дистанции между поверхностью и соплом (рис. 19).



Рис. 19 – Калибровочный винт рабочей платформы

Как правило, платформы оснащаются дополнительным элементом – съемным столиком. Такая конструкция упрощает чистку рабочей поверхности и облегчает снятие готовой модели. Столики производятся из различных материалов, включая алюминий, акрил, стекло и пр. Выбор материала для изготовления столика зависит от наличия подогрева и расходных материалов, под которые оптимизирован принтер.

Для лучшего схватывания первого слоя модели с поверхностью столика зачастую применяются дополнительные средства, включая полиимидную пленку, клей и даже лак для волос! Но наиболее популярным средством служит недорогой, но эффективный малярный скотч. Некоторые производители делают перфорированные столики, хорошо удерживающие модель, но сложные в очистке. В целом, целесообразность нанесения

дополнительных средств на столик зависит от расходного материала и материала самого столика.

МЕХАНИЗМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Само собой, печатающая головка должна перемещаться относительно рабочей платформы, причем в отличие от обычных офисных принтеров, позиционирование должно производиться не в двух, а в трех плоскостях, включая регулировку по высоте (рис. 20).

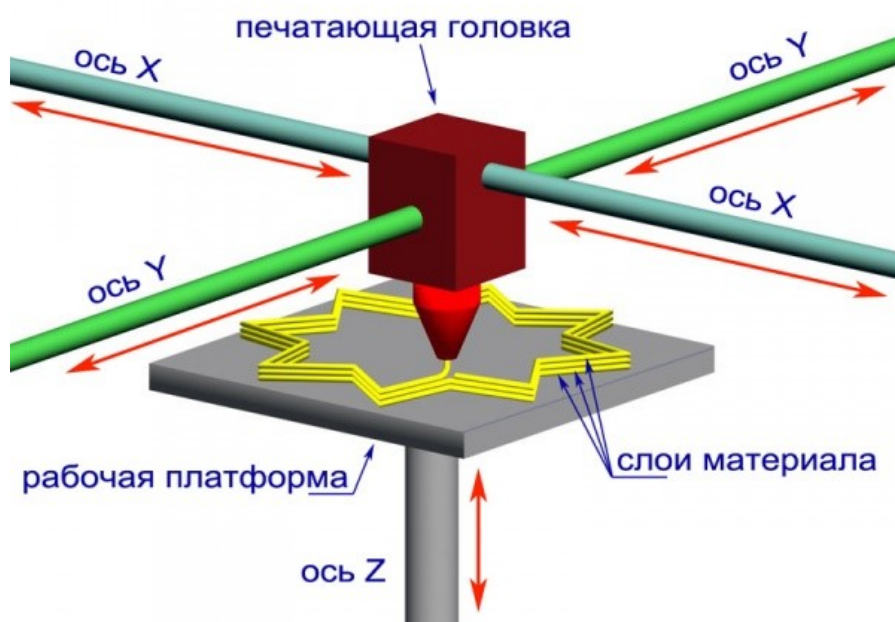


Рис. 20 – Схема работы позиционирующих механизмов

Схема позиционирования может варьироваться. Самый простой и распространенный вариант подразумевает крепление печатающей головки на перпендикулярных направляющих, приводимых в движение пошаговыми двигателями и обеспечивающими позиционирование по осям X и Y.

Вертикальное же позиционирование осуществляется за счет передвижения рабочей платформы.

С другой стороны, возможно передвижение экструдера в одной плоскости, а платформы – в двух.

Один из вариантов, набирающих популярность, является использование дельтаобразной системы координат (рис. 21).

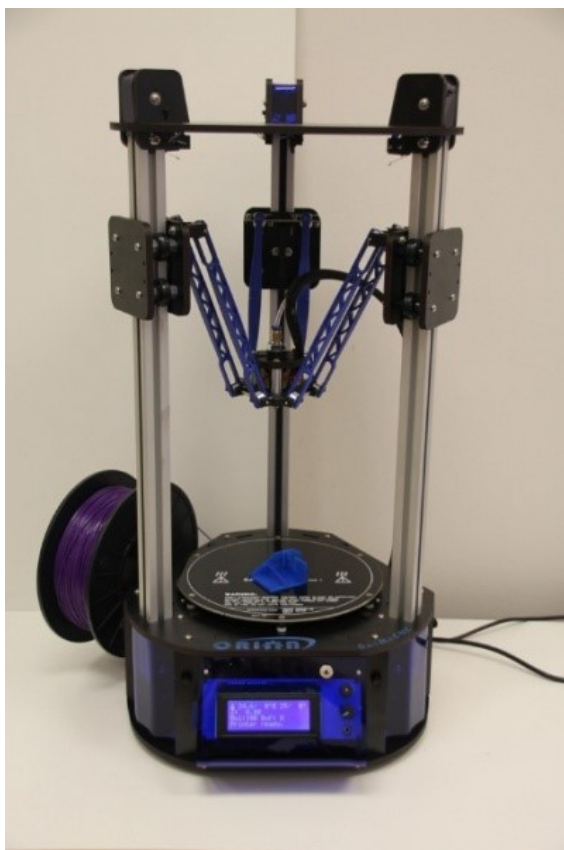


Рис. 21 – Дельта-принтер ORION производства компании SeemeCNC

Подобные устройства в промышленности называют «дельта-роботами».

В дельта-принтерах печатная головка подвешивается на трех манипуляторах, каждый из которых передвигается по вертикальной направляющей.

Синхронное симметричное движение манипуляторов позволяет изменять высоту экструдера над платформой, а ассиметричное движение вызывает смещение головки в горизонтальной плоскости.

Вариантом такой системы является обратный дельтовидный дизайн, где экструдер крепится неподвижно к потолку рабочей камеры, а платформа передвигается на трех опорных манипуляторах.

Дельта-принтеры имеют цилиндрическую область построения, а их конструкция облегчает увеличение высоты рабочей зоны с минимальными изменениями дизайна за счет удлинения направляющих.

В итоге все зависит от решения конструкторов, но основополагающий принцип не меняется.

УПРАВЛЕНИЕ

Управление работой FDM-принтера, включая регулировку температуры сопла и платформы, темпа подачи нити и работы пошаговых моторов, обеспечивающих позиционирование экструдера, выполняется достаточно простыми электронными контроллерами. Большинство контроллеров основываются на платформе Arduino, имеющей открытую архитектуру (рис. 22).

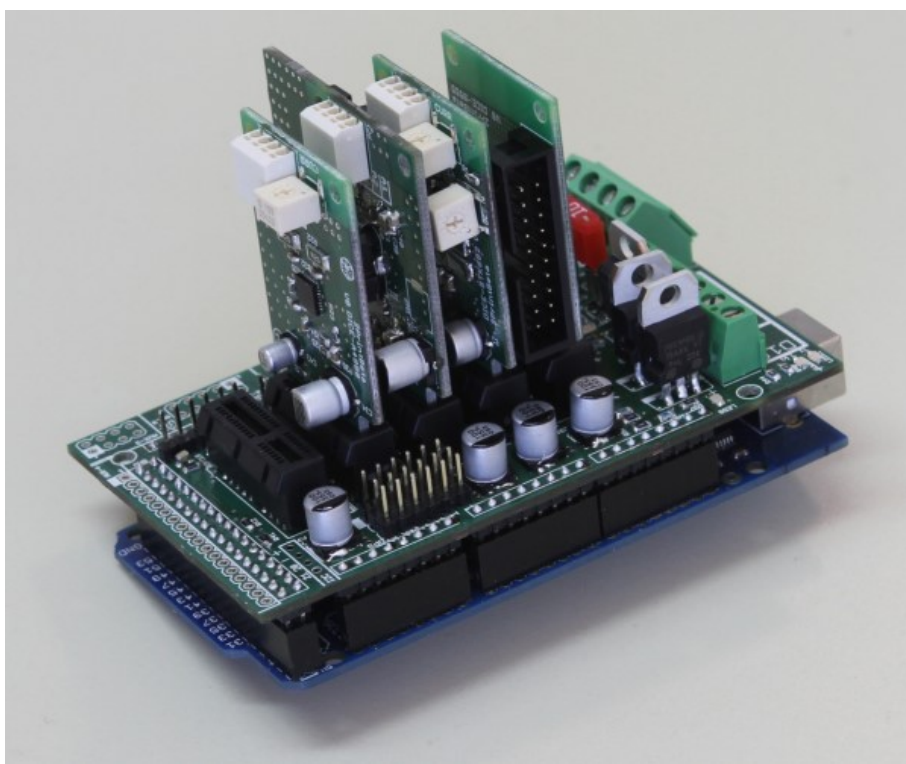


Рис. 22 – Типичный контроллер на основе Arduino, оснащенный дополнительными модулями

Программный язык, используемый принтерами, называется G-код (G-Code) и состоит из перечня команд, поочередно выполняемых системами 3D-принтера. G-код компилируется программами, называемыми «слайсерами» – стандартным программным обеспечением 3D-принтеров, сочетающим некоторые функции графических редакторов с возможностью установки параметров печати через графический интерфейс (рис. 23).

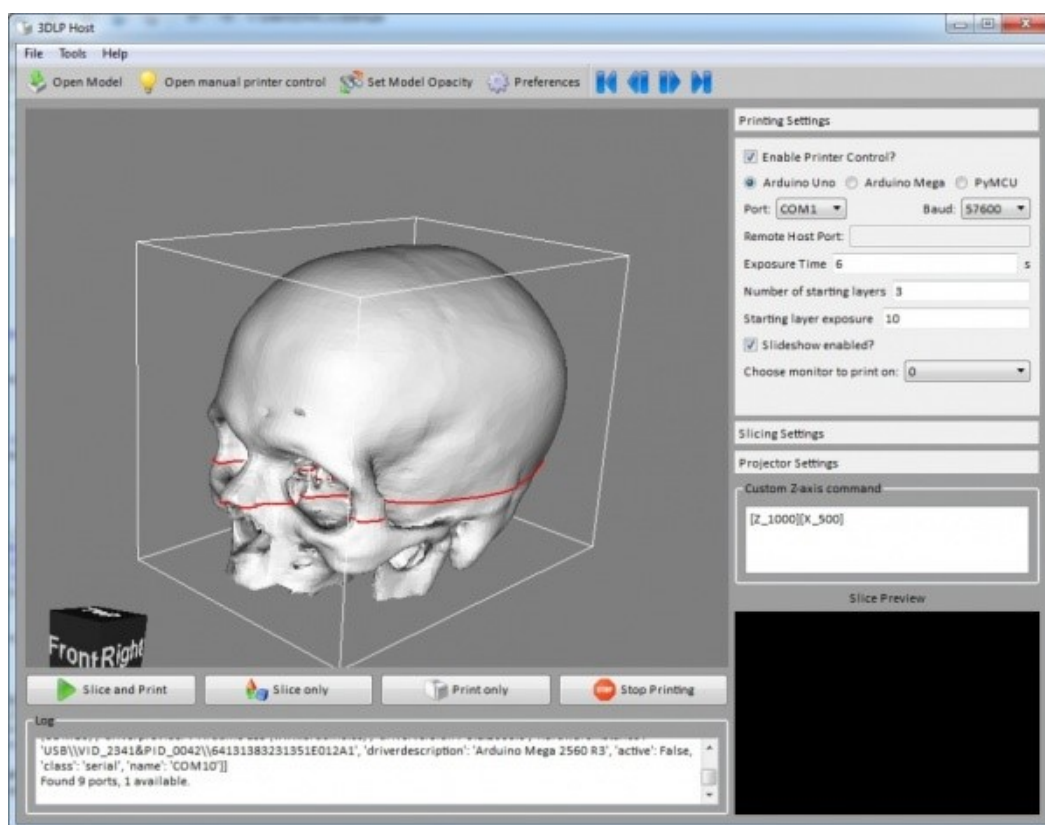


Рис. 23 – Программный код для печати генерируется с помощью слайсеров

Выбор слайсера зависит от модели принтера. Принтеры *RepRap* используют слайсеры с открытым исходным кодом – такие, как *Skeinforge*, *Replicator-G* и *Repetier-Host*. Некоторые компании создают принтеры, требующие использование фирменного программного обеспечения.

В качестве примера можно упомянуть принтеры линейки *Cube* от компании *3D Systems*. Есть и такие компании, которые предлагают фирменное обеспечение, но позволяют использовать и сторонние программы, как в случае с последними поколениями 3D-принтеров компании *MakerBot*.

Слайсеры не предназначены для 3D-проектирования, как такового. Эта задача выполняется с помощью CAD-редакторов и требует определенных навыков трехмерного дизайна. Хотя новичкам не стоит отчаиваться: цифровые модели самых различных дизайнов предлагаются на многих сайтах, зачастую даже бесплатно. Наконец, некоторые компании и частные специалисты предлагают услуги 3D-проектирования для печати на заказ.

И наконец, 3D-принтеры можно использовать вкупе с 3D-сканерами, автоматизирующими процесс оцифровки объектов. Многие из таких устройств создаются специально для работы с 3D-принтерами. Наиболее известные примеры включают ручной сканер *3D Systems Sense* и портативный настольный сканер *MakerBot Digitizer*.

Пользовательский интерфейс 3D-принтера может состоять из банального USB порта для подключения к персональному компьютеру. В таких случаях управление устройством фактически осуществляется посредством слайсера.

Недостатком такой упрощенности является достаточно высокая вероятность сбоя печати при зависаниях или притормаживании компьютера.

Более продвинутый вариант включает наличие внутренней памяти или интерфейса для карты памяти, что позволяет сделать процесс автономным (рис. 24).

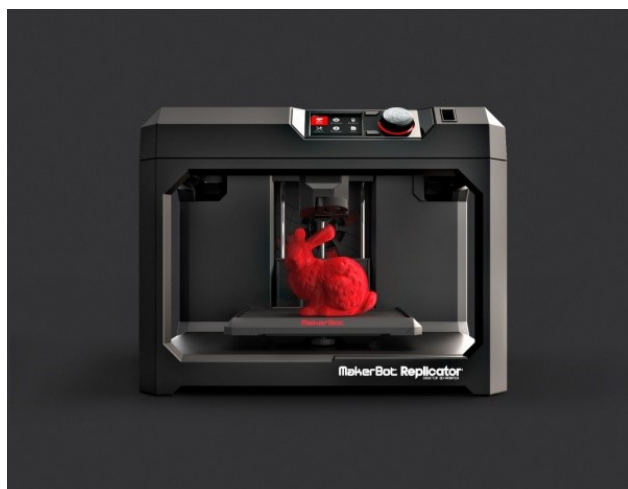


Рис. 24 – FDM-принтер *MakerBot Replicator* 5-го поколения, со встроенным контрольным модулем в верхней части рамы

Такие модели оснащаются контрольными модулями, позволяющими регулировать многие параметры печати (например, скорость печати или

температуру экструзии). В состав модуля может входить небольшой LCD-дисплей или даже мини-планшет.

РАЗНОВИДНОСТИ FDM-ПРИНТЕРОВ

Печать осуществляется на приборах – 3D-принтерах – позволяющих перемещать печатающую головку в 3-х мерном пространстве (рис. 25). FDM-принтеры весьма и весьма разнообразны, начиная от простейших самодельных RepRap принтеров и заканчивая промышленными установками, способными печатать крупногабаритные объекты.



Рис. 25 – FDM-принтер для печати полимерными филаментами

В качестве расходного материала чаще всего используются различные пластики, хотя есть и модели, позволяющие работать с другими материалами – оловом, сплавами металлов с невысокой температурой плавления и даже шоколадом.

Минусы, присущие данной методике, очевидны:

- невысокая скорость работы (но, собственно, очень уж высокой скоростью не могут похвастать и другие технологии: для построения крупных и сложных моделей требуются многие часы и даже десятки часов);
- небольшая разрешающая способность как по горизонтали, так и по вертикали, что приводит к более или менее заметной слоистости поверхности изготовленной модели;
- проблемы с фиксацией модели на рабочем столе (первый слой должен прилипнуть к поверхности платформы, но так, чтобы готовую модель можно было снять); их

пытаются решить разными способами — подогревом рабочего стола, нанесением на него различных покрытий, однако совсем и всегда избежать не получается;

- для нависающих элементов требуется создание поддерживающих структур, которые впоследствии приходится удалять, но даже с учетом этого некоторые модели попросту невозможно сделать на FDM-принтере за один цикл, и приходится разбивать их на детали с последующим соединением склейкой или другим способом.

Таким образом, для очень многих образцов, изготовленных по технологии FDM, потребуется более или менее сложная финишная обработка, которую сложно или невозможно механизировать, поэтому в основном она производится вручную.

Есть и менее очевидные недостатки, например, зависимость прочности от направления, в котором прикладывается усилие. Так, можно сделать образец достаточно прочным на сжатие в направлении, перпендикулярном расположению слоев, но вот на скручивание он будет гораздо менее прочным: возможен разрыв по границе слоев.

Другой момент в той или иной мере присущ любой технологии, связанной с нагревом – это термоусадка, которая приводит к изменению размеров образца после остывания. Конечно, тут много зависит от свойств используемого материала, но порой нельзя примириться даже с изменениями в несколько десятых долей процента.

Технология только на первый взгляд может показаться безотходной. И речь не только о поддерживающих структурах в сложных моделях, немало пластика уходит в отходы даже у опытного оператора при подборе оптимального для конкретной модели режима печати.

Почему же при таком количестве проблем эта технология сейчас стала столь популярной?

Главная и определяющая причина – цена как на сами принтеры, так и на расходные материалы к ним. Первым важным толчком в процессе продвижения FDM-принтеров «в массы» стало истечение в 2009 году срока действия патентов, вследствие чего за пять лет цены на такие принтеры снизились более чем на порядок, а если рассмотреть крайности (самые дорогие до 2009 года и самые дешевые сегодня), то и на два порядка. Цена на самые дешевые принтеры китайского производства сегодня составляет всего 300–400 долларов — правда, скорее всего пользователь в них моментально разочаруется. Более приличные принтеры начального уровня сейчас имеют цену уже ближе к \$1200–1500 (рис. 26).

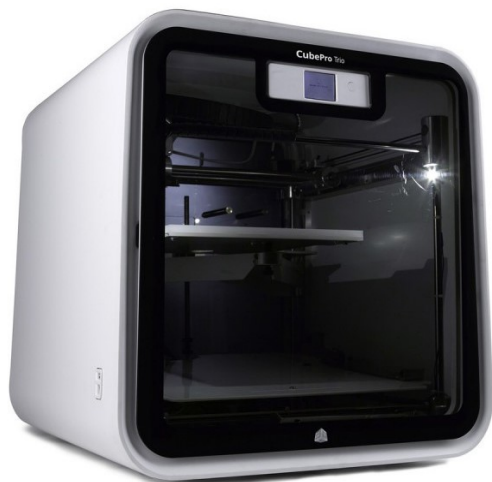


Рис. 26 – *CubePro Trio* – профессиональный 3D принтер от Американской компании 3D Systems

Лидером по производству промышленных установок является компания *Stratasys*, основанная автором технологии FDM-печати Скоттом Крапом (рис. 27).



Рис. 27 – Профессиональный FDM-принтер *Stratasys Fortus 360mc*, позволяющий печатать нейлоном

Вторым немаловажным фактором стало появление проекта RepRap, или Replicating Rapid Prototyper – самовоспроизводящийся механизм быстрого прототипирования. Самовоспроизведение касается изготовления на уже сделанном принтере частей для другого подобного принтера – конечно, не всех, а лишь тех, которые можно создать в рамках данной технологии, все прочее приходится покупать. И оно не было самоцелью проекта – главной задачей стало создание максимально дешевых моделей принтеров, доступных даже частным энтузиастам, не обремененным излишком денег, но желающим попробовать свои силы в 3D-печати. Более того, самовоспроизводящимися (в сколь-нибудь заметной части всех деталей) были и есть далеко не все прототипы, созданные в рамках RepRap.

Мы не будем заниматься подробным описанием этапов становления проекта RepRap, разбором достоинств и недостатков таких прототипов, как *Darwin, Mendel, Prusa Mendel, Huxley*.

RepRap принтеры могут быть использованы для печати пластиковых деталей, включенных в собственную конструкцию. Контроллер, направляющие, ремни, моторы и прочие компоненты можно легко приобрести по отдельности. Разумеется, сборка подобного устройства своими силами требует серьезных технических и даже инженерных навыков.

Некоторые производители облегчают задачу, продавая комплекты для самостоятельной сборки, но подобные конструкторы все равно требуют хорошего понимания технологии.

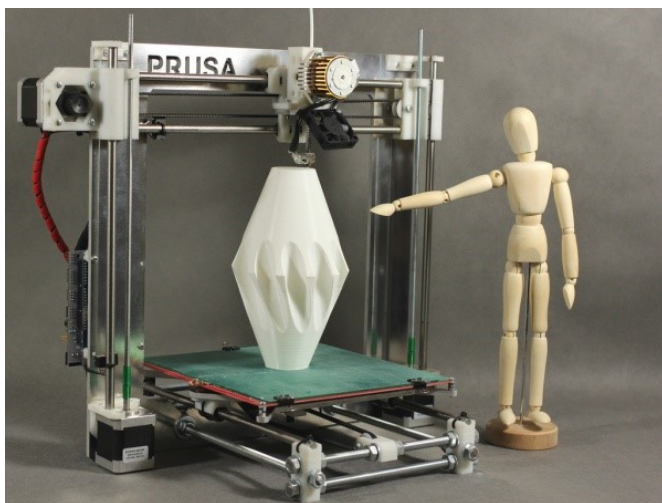


Рис. 27 – Вариант популярного *RepRap* принтера *Prusa* позднего, третьего поколения

Если же вам по душе мастерить вещи собственными руками, то RepRap принтеры приятно порадуют ценой: средняя стоимость популярного дизайна *Prusa Mendel* ранних поколений составляет порядка \$500 в полной комплектации (рис. 27). Несмотря на свою «самодельную сущность», RepRap принтеры вполне способны производить модели с качеством на уровне дорогих фирменных собратьев.

Конечно, создаваемые таким образом принтеры чаще всего далеки от совершенства даже в рамках технологии FDM, но они позволяют с минимальными финансовыми затратами создать вполне работоспособный аппарат. Нужно отметить: сегодня вовсе не обязательно искать обладателя принтера, чтобы напечатать возможные детали, и бегать по магазинам в поисках остального; предлагаются полные наборы для самостоятельной сборки принтера, так называемые DIY kits (от «Do It Yourself» — сделай это сам), которые позволяют и заметно сэкономить, и избежать лишней беготни и хлопот, да к тому же содержат подробные инструкции по сборке (рис. 28).

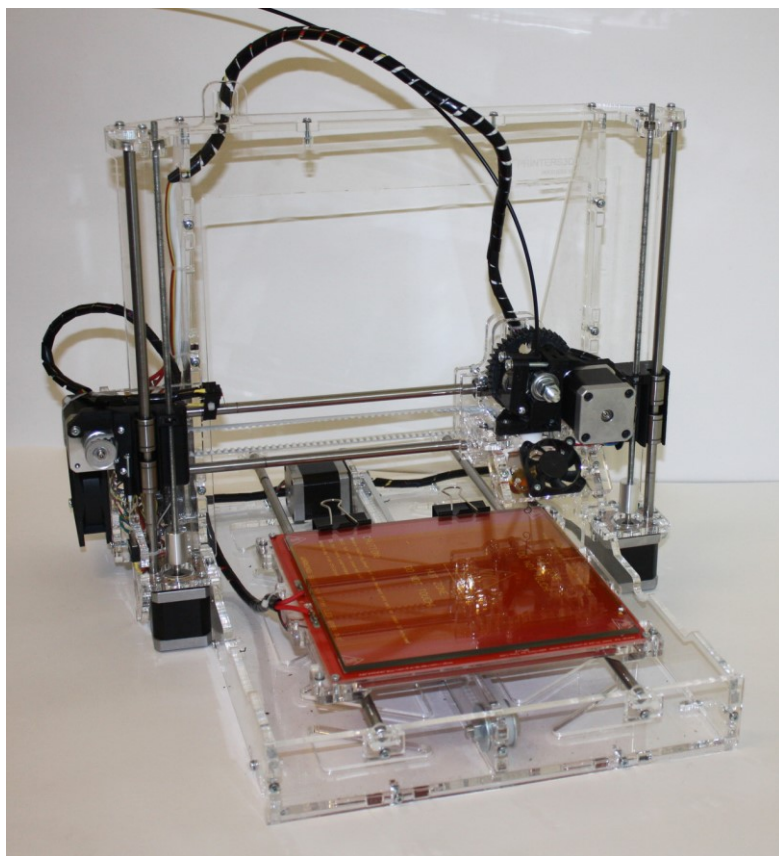


Рис. 28 – Типичный DIY kits FDM-принтер проекта RepRap

Обыденные же пользователи, не желающие вникать в тонкости процесса, а требующие лишь удобное устройство для бытовой эксплуатации, могут приобрести FDM-принтер в готовом виде.

Многие компании делают упор на развитие именно пользовательского сегмента рынка, предлагая на продажу 3D-принтеры, готовые к печати «прямо из упаковки» и не требующие серьезных навыков в обращении с компьютерами (рис. 29).

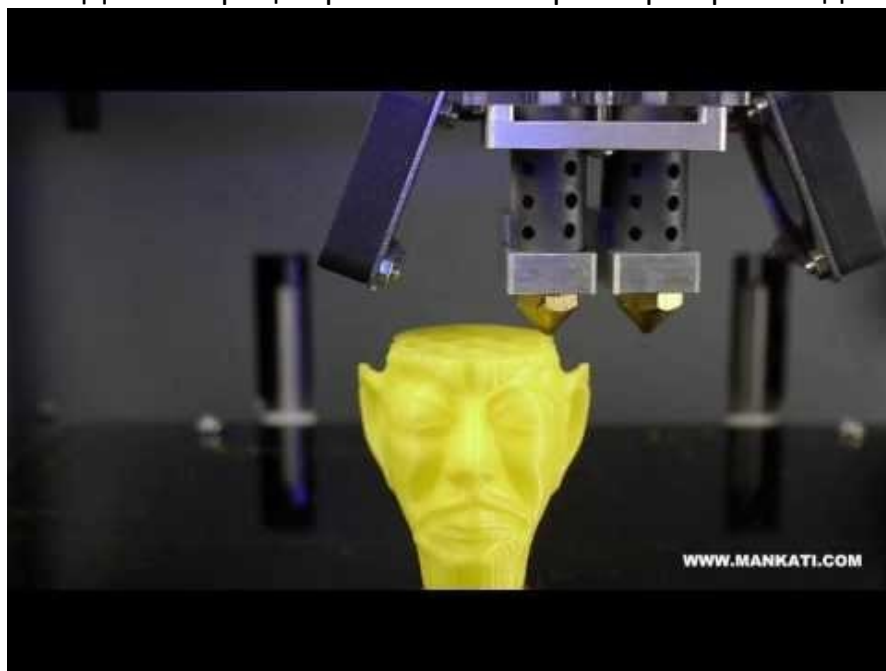


Рис. 29 – Бытовой 3D-принтер *Cube* производства компании *3D Systems*

Самым известным примером бытового 3D-принтера служит *3D Systems Cube*. Хотя это устройство и не блещет огромной зоной построения, сверхвысокой скоростью печати или непревзойденным качеством изготовления моделей, оно удобно в использовании, вполне доступно и

безопасно: этот принтер получил необходимую сертификацию для использования даже детьми.

Демонстрация работы FDM-принтера производства компании *Mankati*:



Но есть простор и для тех, кто не хочет замыкаться в рамки готовых конструкций и желает внести в них что-то свое – есть масса предложений по любым отдельным комплектующим для подобных принтеров (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристики различных FDM-принтеров

Производитель, сайт, модель	Тип принтера	Материалы	Кол-во сопел/ диаметр, мм	Толщина слоя, мм	Подогрев стола	Герметичная камера	Макс. размеры детали, мм	Цена, руб.
3Д-Эксперты, Prusa Mendel	RepRap	ABS,PLA	1/0,5	0,3-0,5	есть	нет	200x200x120	29900
3Д-Эксперты, Engineer V2	DIY-kit	ABS,PLA,HIPS,Nylon, FilaFlex, PC-пластик, Laywoo	1/0,35	0,1-0,35	есть	нет	200x200x180	43900
Центр аддитивных технологий, Альфа	DIY-kit	ABS, PLA	1/0,3/0,1-0,4	0,1-0,3	есть	нет	215x215x165	35000
Picaso 3D, Designer PRO 250	Full	Nylon, ASA, ABS/PC, PET, Elastic, ABS+HIPS и PLA+PVA	2/0,3, 0,15	0,05	есть	да	200x200x210	140000
3D Quality, Prism Pro	Full	ABS, PLA, PVA, HIPS	1/0,3	0,03-0,3	есть	да	400x400x850	175000
Центр аддитивных технологий, Альфа	Full	ABS, PLA	1/0,3	0,1-0,3	есть	да	200x200x200	55000

Еще одна положительная сторона развития проекта RepRap – появление и совершенствование различного программного обеспечения для работы с подобными 3D-принтерами, причем распространяемого свободно. В этом немаловажное отличие от аппаратов, выпускаемых именитыми производителями, которые работают только с собственным ПО.

В принципе, проект не замыкается на технологии FDM, но пока именно она является наиболее доступной, равно как наиболее доступным материалом является пластиковая нить, которая и используется в подавляющем большинстве принтеров, создаваемых на базе разработок проекта RepRap.

Помимо цены, у FDM-принтеров есть другие достоинства, связанные с возможностями технологии. Так, очень легко оснастить принтер второй печатающей головкой, которая может подавать нить из легко удаляемого материала для создания поддержек в сложных моделях. Внеся краситель при изготовлении пластиковой нити, можно получать различные, очень яркие цвета.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ FDM-ПЕЧАТИ

Широкое распространение FDM-принтеров привело к увеличению спроса на расходные материалы к ним; предложение не могло не последовать за спросом, и произошло то же самое, что и с самими принтерами – цены рухнули. Если раньше цены были на уровне 2-3 и даже более сотен евро за килограмм пластиковой нити, то сейчас повсеместно речь идет о десятках евро, и лишь на новые материалы с необычными свойствами цена может достигать сотни долларов или евро за килограмм. Правда, если раньше продавались в основном «фирменные» материалы, то теперь зачастую предлагается нить непонятного происхождения и неопределенного качества, но это неизбежно сопутствует популярности.

Да и сам материал нити может иметь самые разные свойства, поэтому рассмотрим вкратце наиболее распространенные типы полимерных материалов для 3D-печати.

Пластиковая нить может быть двух стандартных диаметров: 1,75 и 3 мм. Естественно, они не взаимозаменяемы, и выбор нужного диаметра следует уточнять по спецификации принтера. Поставляется пластик на катушках (рис. 30) и измеряется не длиной, а весом. Для FDM-принтеров некоторых производителей (например, CubeX от 3D Systems) нужно покупать не катушки,

а специальные картриджи с нитью, которые в пересчете на килограмм обходятся заметно дороже, но производитель гарантирует качество материала – словом, все точно так, как в обычных принтерах: «оригинальные» и «совместимые» расходные материалы.



Рис. 30 – Материалы для FDM-печати

Для каждого типа материала должны быть известны рабочая температура, до которой должен нагреваться материал в печатающей головке, и температура подогрева рабочего стола (платформы) для лучшего прилипания первого слоя. Эти величины не всегда одинаковы для любого образца нити, сделанной из материала одного типа, поэтому мы указываем примерный диапазон; по идее, оптимальные температуры должны указываться на этикетке катушки или в сопроводительном документе, но это происходит далеко не всегда, и зачастую их приходится подбирать экспериментально.

Основными материалами для FDM-принтеров являются пластики ABS и PLA.

ABS (сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола, АБС-пластик) – это ударопрочный технический термопластичный материал на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. Этот непрозрачный пластик, который легко окрашивается в разные цвета.

Достоинства ABS-пластика:

- долговечность;
- ударопрочность и относительная эластичность;
- нетоксичность;
- влаго- и маслостойкость;
- стойкость к щелочам и кислотам;
- широкий диапазон эксплуатационных температур: от -40°C до $+90^{\circ}\text{C}$, у модифицированных марок до $100\text{--}110^{\circ}\text{C}$.

К достоинствам следует отнести невысокую стоимость, растворимость в ацетоне (что позволяет не только склеивать детали из ABS-пластика, но также сглаживать с помощью ацетона неровную поверхность). ABS-пластик более жесткий материал, чем полилактид (PLA), и потому сохраняет форму при больших нагрузках.

Из недостатков надо упомянуть следующие:

- несовместимость с пищевыми продуктами, особенно горячими, поскольку при определенных условиях (высокой температуре) может выделять циановодород;
- неустойчивость к ультрафиолетовому излучению (т. е. не любит прямых солнечных лучей);
- термоусадка заметно выше, чем у PLA;
- более хрупкий материал, чем PLA.

Рабочая температура печати ABS-пластиком выше, чем у PLA, и находится в диапазоне $210\text{--}270^{\circ}\text{C}$. При работе с нитью ABS ощущается слабый запах. Кроме того, для лучшего прилипания первого слоя модели к рабочему столу требуется подогрев стола примерно до 110 градусов.

Что касается цены на ABS-пластик, то встречаются упоминания $\$30\text{--}40$ за килограммовую катушку. Реально цены в России начинаются от 1500 (мелкий опт) до 2000 и более (розница) рублей за килограмм, если речь идет о китайских производителях. ABS-нить от известных фирм, изготовленная в США, может быть в полтора-два раза дороже.

PLA (полилактид, ПЛА-пластик) – биоразлагаемый, биосовместимый полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Сырьем для производства служат возобновляемые ресурсы – например, кукуруза или сахарный тростник, поэтому материал является нетоксичным и может применяться для производства экологически чистой упаковки и одноразовой посуды, а также в медицине и в средствах личной гигиены.

Сразу отметим – биоразлагаемость вовсе не синоним крайней недолговечности, изделия из PLA вполне жизнеспособны.

Достоинства:

- низкий коэффициент трения, делающий его пригодным для изготовления подшипников скольжения;
- малая термоусадка, особенно в сравнении с АБС-пластиком;
- менее хрупкий и более вязкий, чем АБС-пластик – при одинаковых нагрузках скорее согнется, чем сломается.

Рабочая температура печати ПЛА-пластиком ниже, чем у ABS: около 180–190 °С. Подогрев рабочего стола не является обязательным, но желательно все же нагревать стол до 50–60 °С.

Недостатки: один из них мы уже упомянули – меньшую, чем у ABS, долговечность. Кроме того, PLA более гигроскопичен, и даже при хранении требует соблюдения режима влажности, иначе может начаться расслоение материала и появление в нем пузырьков, что приведет к дефектам при изготовлении модели. К тому же PLA зачастую немного дороже ABS, хотя цена сильно зависит от производителя и продавца.

Ацетон практически не оказывает воздействия на PLA, его приходится склеивать и обрабатывать дихлорэтаном, хлороформом или другими хлорированными углеводородами, что требует повышенных мер безопасности при работе (но, конечно, и ацетон в этом плане не подарок).

Основные технические характеристики АБС- и ПЛА-пластиков приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Технические характеристики АБС- и ПЛА-пластиков

Характеристики	ABS	PLA
Плотность	1,05 г/см ³	1,25 г/см ³
Предел прочности на разрыв	30 МПа	40 МПа
Ударная вязкость	8-20 КДж/м ² (ИЗОД)	16 Дж/м (Шарпи)
Температура размягчения	~100°С	~50°С
Температура плавления	~220°С	~180°С
Показатель текучести расплава (220°С/10 кг)	5–9 г/10 мин	–

Другие материалы для FDM-печати распространены гораздо меньше.

HIPS (High-impact Polystyrene, ударопрочный полистирол) – материал непрозрачный, жесткий, твердый, стойкий к ударным воздействиям, к морозу и перепадам температур. Растворяется в лимонене – естественном

растворителе, извлекаемом из цитрусовых, и потому может использоваться для создания поддерживающих структур, которые не придется удалять механически. Рабочая температура около 230 °С, цена на 30–50% выше, чем у ABS.

Нейлон – полиамид ПА (РА) – легкий, гибкий, устойчивый к химическому воздействию. Детали из него обладают очень низким поверхностным трением.

Рабочая температура выше, чем у PLA: около 240–250 °С. Правда, при этом не выделяется паров или запахов. Стоимость нейлоновой нити в два раза больше, чем PLA или ABS.

РС (Polycarbonate, поликарбонат) — довольно твёрдый полимер, сохраняющий свои свойства в диапазоне температур от –40 °С до 120 °С. Обладает высоким светопропусканием и часто используется в качестве заменителя стекла, а поскольку еще имеет меньшую удельную массу и более высокий коэффициент преломления, то прекрасно подходит для производства линз. Полная биологическая инертность позволяет делать из него даже контактные линзы. Кроме того, из него изготавливают компакт-диски.

Температура печати 260–300 °С. В виде нити для FDM-печати пока выпускается мало, поэтому цена втрое выше, чем у ABS.

Похожими оптическими свойствами обладает **PETТ** (Polyethylene terephthalate, полиэтилентерефталат). Модели из него получаются очень прочными, поскольку слои расплавленного материала отлично склеиваются. Рабочая температура 210–225 °С, стол желательно подогреть до 50–80 °С. Цена около 4500–5000 рублей за килограмм.

Под аббревиатурой **PVA** (ПВА) могут скрываться два типа материала: поливинилацетат (Polyvinyl Acetate, PVAc) и поливиниловый спирт (Polyvinyl Alcohol, PVAI). По химической формуле они довольно похожи, только в поливиниловом спирте отсутствуют ацетатные группы, и свойства их тоже совпадают — во многом, но не во всем. К сожалению, продавцы зачастую указывают просто «PVA (ПВА)», не делая различий, поэтому мы можем привести только обобщенную примерную цену: 4500–5000 рублей за килограмм нити.

Поливиниловый спирт **PVAI** требует рабочей температуры около 180–200 °С, дальнейшее ее повышение нежелательно – может начаться пиролиз (термическое разложение). Кроме того, материал очень гигроскопичен, он активно поглощает влагу из воздуха, что создает проблемы и при хранении, и

при печати, особенно если диаметр нити 1,75 мм. С другой стороны, это же свойство является очень полезным: поддержки, сделанные из PVAI, растворяются в холодной воде.

Поливинилацетат PVAc всем хорошо известен как составная часть клея ПВА, представляющего собой водную эмульсию этого вещества. Для него требуется немного более низкая рабочая температура: 160–170 градусов. Он также хорошо растворяется в воде.

Все время появляются новые материалы с оригинальными свойствами. Правда, цена на них в первое время может быть очень высокой.

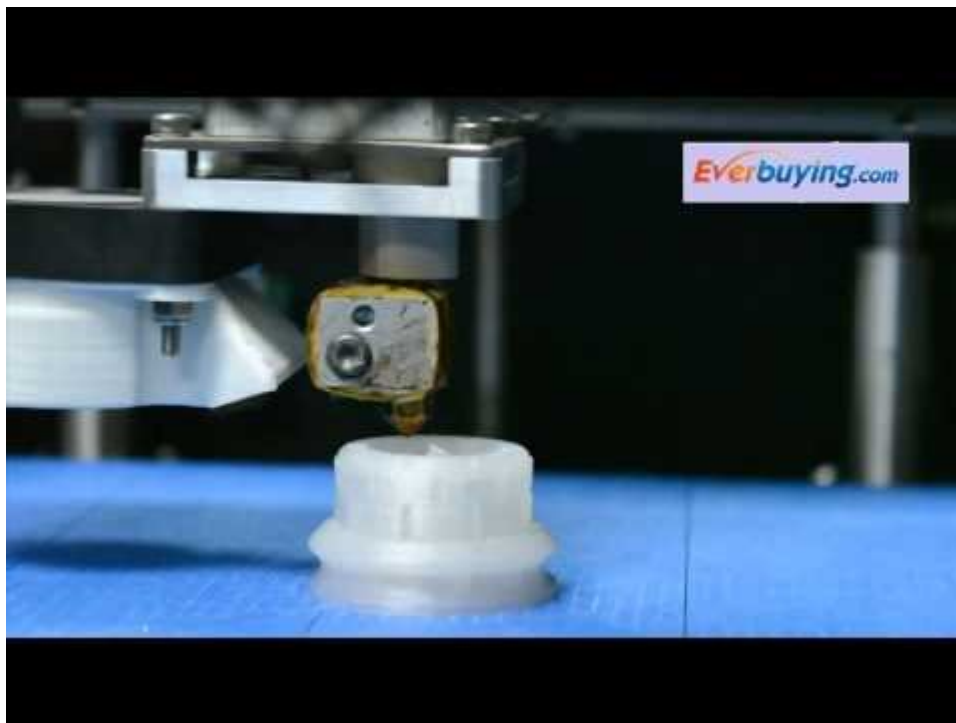
Например, эластомер *NinjaFlex* позволяет создавать эластичные изделия. Цена около 7500–8000 рублей за килограмм, рабочая температура 210–225 °С, температура стола может быть комнатной или слегка повышенной, до 35–40 °С.

Недавно появившийся материал *Laywoo-D3* интересен прежде всего тем, что изделия из него по фактуре напоминают дерево и даже пахнут, как деревянные. Дело в том, что его как раз и делают на основе мелких частиц дерева и связующего полимера. Рабочие температуры могут быть в диапазоне 175–250 °С, подогрев стола не требуется. Причем цвет после застывания будет зависеть от выбранной температуры: чем она выше, тем темнее. Меняя температуру во время печати, можно даже получить подобие годовых колец, как на натуральном дереве. Конечно, и цена на этот материал немалая — около 10 тысяч рублей за килограмм.

Другой экзотический материал, *Laybrick*, содержит минеральные наполнители и позволяет имитировать изделия из песчаника. Рабочая температура находится в пределах 165–210 °С; на этот раз с повышением температуры можно получить более грубую поверхность для усиления эффекта имитации. Он также не требует подогрева стола, но по окончании печати следует выждать несколько часов, чтобы модель окончательно затвердела, и лишь потом снимать ее. Цена те же 10 тысяч рублей за килограмм.

Конечно, все указанные выше цены являются лишь ориентиром: они могут меняться как по простетвию времени, так и от продавца к продавцу, особенно если покупать не в России, а заказывать за рубежом.





SLA – ЛАЗЕРНАЯ СТЕРЕОЛИТОГРАФИЯ

Стереолитографические принтеры – вторые по популярности и распространенности после FDM-принтеров.

Эти устройства позволяют добиваться исключительно высокого качества печати. Самый компактный в мире 3D принтер, работающий по SLA технологии – *ProJet 1200* (рис. 31) – профессиональный 3D-принтер от компании *3D Systems*. Нашел свое основное применение в стоматологии и ювелирной промышленности.



Рис. 31 – Стереолитографические 3D-принтеры широко используются в зубном протезировании

Разрешение некоторых SLA-принтеров исчисляется считанными микронами – неудивительно, что эти устройства быстро завоевали любовь ювелиров и стоматологов.



Рис. 32 – 3D-принтер *ProJet 6000 MP*

Еще один представитель этого семейства 3D-принтеров – ProJet 6000 MP (рис. 32) — профессиональный 3D принтер от лидера в сфере 3D технологий американской компании 3D Systems. Этот принтер нашел свое основное применение в медицине. Его используют при изготовлении протезов, прототипов органов и слуховых аппаратов. Помимо этого его используют также в косметической, автомобильной и ювелирной сфере. Обладает широким выбором расходных материалов. Это позволяет выполнять работы любой сложности и под различные сферы. *ProJet 6000 MP* может вести печать в 3 режимах: HD — высокое качество печати и UHD — очень высокое качество печати и XHD — максимально высокое качество.

Программная сторона лазерной стереолитографии практически идентична FDM-печати, поэтому не будем повторяться и затронем лишь отличительные особенности технологии.

ЛАЗЕРЫ И ПРОЕКТОРЫ

Стоимость стереолитографических принтеров стремительно снижается, что объясняется растущей конкуренцией ввиду высокого спроса и применением новых технологий, удешевляющих конструкцию.

SLA-принтер для 3D-печати включает в себя (на примере фотополимерного SLA 3D-принтера *ATSMake* компании *TMTCTW*, рис. 33):

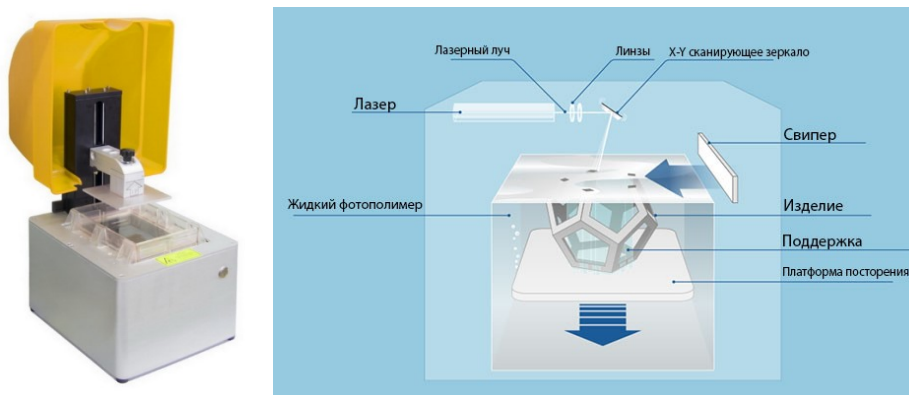


Рис. 33 – Устройства 3D-принтера, работающего по SLA технологии

- источник УФ излучения, который находится внизу принтера. В данном случае, это лазер. Чем сильнее источник, тем оперативнее создается объект и тем быстрее снашивается емкость для полимера.
- корпус. Большой и массивный корпус уменьшает шансы влияния вибрации на процесс печати
- гальванометр (гальванометрический сканатор) — это приспособление состоит из двух зеркал и двух гальванометрических высокоточных двигателей. При помощи данной конфигурации можно с ювелирной точностью управлять лазерным лучом и с большой скоростью в двумерной плоскости легко рисовать разнообразные трудоемкие предметы. Например, быстрота передвижения лазерного луча в 3D принтере *ATSMake* может достигать 2500 мм в секунду, что в несколько десятков раз больше чем скорость FDM конкурентов.
- платформа для 3D печати. Чаще всего это большая плоскость из алюминия с безупречно ровным дном.
- зеркало, которое закреплено под углом 45 градусов и отбивает луч лазера на дно емкости.
- механизм, поднимающий/опускающий платформу. В случае с *ATSMake* — это высокоточная рельсовая направляющая, выдвигная платформа и мощный двигатель. В роли ограничителей выступают оптические концевики с вмонтированными светодиодами. О точности такой системы волноваться не стоит.

- емкость для полимера («ванночки с прозрачным» дном). Вид емкости может быть абсолютно любой. Есть только одно обязательное требование — это прозрачное, для ультрафиолета, дно и большой уровень скольжения поверхности. В 3D принтерах ATSMake применяется 3мм акрил, покрытый прозрачным силиконом.
- плата управления. Чаще всего, для подобных задач применяется Arduino Mega в комплекте с необходимой обвязкой.
- механизм, который качает емкость (поочередно поднимает, а потом опускает одну из сторон емкости). В результате данного «кивка», который совершается после создания каждого слоя, фотополимер, находящийся в емкости, перемешивается, а новый слой намного легче отрывается от дна ванночки.

Как вы видите, эта технология не очень хитра, по этой причине инженеры ТМТСТW не только сумели ее создать и вывести на рынок, но и модифицировать. К примеру, в 3D-принтере *ATSMake* используется голубой лазер, который по мощности в 2 раза превосходит типичные лазеры других 3D-принтеров. Некоторые SLA и DLP принтеры работают по «перевернутой» схеме: модель не погружается в расходный материал, а «вытягивается» из него, в то время как лазер или проектор размещаются под кюветой, а не над ней. Такой подход устраняет необходимость выравнивания поверхности после каждой засветки, но требует использования кюветы из прозрачного для ультрафиолетового света материала – например, из кварцевого стекла.

Несмотря на то, что технология обобщенно называется «лазерной» стереолитографией, наиболее современные разработки в большинстве своем применяют ультрафиолетовые светодиодные проекторы (рис. 34).

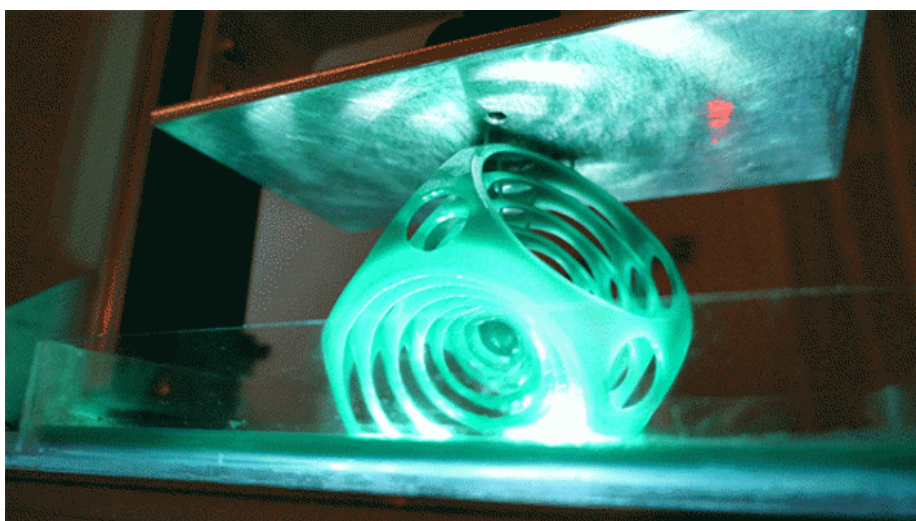


Рис. 34 – Проекторная засветка фотополимерной модели на примере *DLP*-принтера *Kudo3D Titan*

Проекторы дешевле и надежнее лазеров, не требуют использования деликатных зеркал для отклонения лазерного луча, а также имеют более высокую производительность. Последнее объясняется тем, что контур целого слоя засвечивается целиком, а не последовательно, точка за точкой, как в случае с лазерными вариантами. Этот вариант технологии называется проекторной стереолитографией, *DLP-SLA* или просто *DLP*. Тем не менее, на данный момент распространены оба варианта – как лазерные, так и проекторные версии.

КЮВЕТА И СМОЛА

В качестве расходных материалов для стереолитографических принтеров используется фотополимерная смола, внешне напоминающая эпоксидную. Смолы могут иметь самые разные характеристики, но все они обладают одной чертой, краеугольной для применения в 3D-печати: эти материалы затвердевают под воздействием ультрафиолетового света. Отсюда, собственно, и название «фотополимерные».

В полимеризованном виде смолы могут иметь самые разные физические характеристики. Некоторые смолы напоминают резину, другие – твердые пластики вроде ABS. Возможен выбор разных цветов и степени прозрачности. Главный же недостаток смол и SLA-печати в целом – стоимость расходных материалов, значительно превышающая стоимость термопластиков.

С другой стороны, стереолитографические принтеры в основном применяются ювелирами и стоматологами, не требующими построения деталей большого размера, но ценящими экономию от быстрого и точного прототипирования изделий. Таким образом, SLA-принтеры и расходные материалы окупаются очень быстро.

Смола заливается в кювету (рис. 34), которая может оснащаться опускаемой платформой. В этом случае принтер использует выравнивающее устройство для разглаживания тонкого слоя смолы, покрывающего платформу, непосредственно перед облучением. По мере изготовления модели платформа вместе с готовыми слоями «утапливается» в смоле. По завершении печати модель вынимается из кюветы, обрабатывается специальным раствором для удаления остатков жидкой смолы и помещается в ультрафиолетовую печь, где производится окончательная засветка модели.



Рис. 34 – Фотополимерная смола заливается в кювету

Точность стереолитографических принтеров чрезвычайно высока. Для сравнения, эталоном вертикального разрешения для FDM-принтеров считается 100 микрон, а некоторые варианты SLA-принтеров позволяют наносить слои толщиной всего в 15 микрон. Но и это не предел. Проблема, скорее, не столько в точности лазеров, сколько в скорости процесса: чем выше разрешение, тем ниже скорость печати. Использование цифровых проекторов позволяет значительно ускорить процесс, ибо каждый слой засвечивается целиком. Как результат, производители некоторых DLP-принтеров заявляют о возможности печатать с разрешением в один микрон по вертикали (рис. 35)!



Рис. 35 – Пример модели, напечатанной на лазерном SLA 3D-принтере

Преимущества технологии SLA:

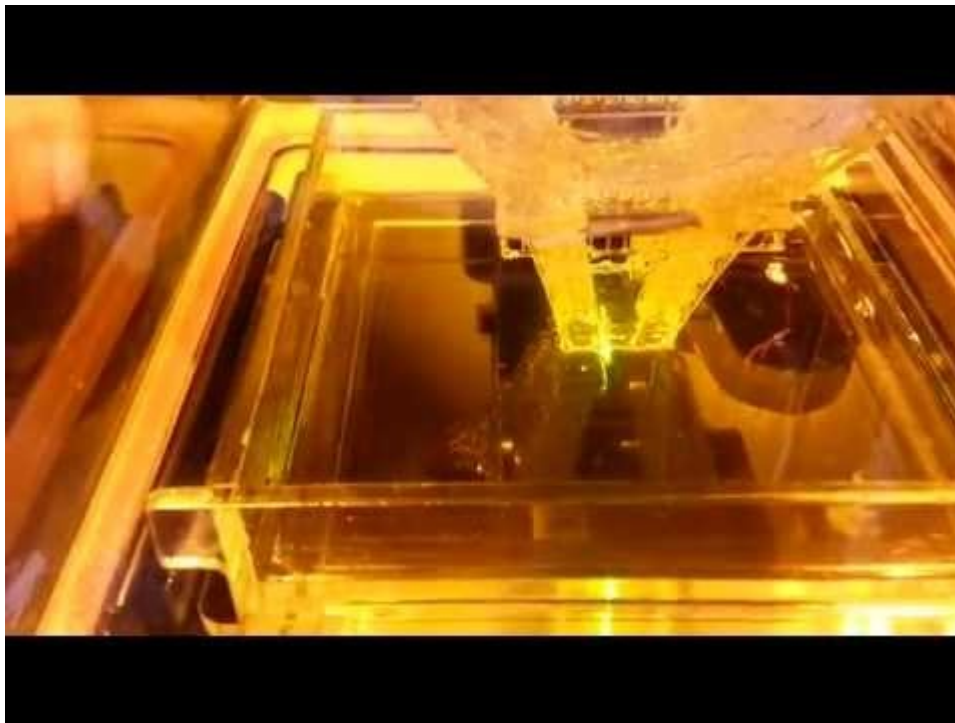
- Изготовление моделей любой сложности(тонкостенные детали, мелкая детали)
- Легкая обработка изготовленной детали
- Высокая точность построения и высокое качество поверхности
- Шроta применяемых материалов, в том числе для литья по выжигаемым моделям
- Свойства применяемых полимеров позволяют использовать выращенный прототип в качестве готового изделия
- Традиционно большие, по сравнению с 3D принтерами, размеры рабочей камеры
- Низкий процент расходного материала на поддержку
- Низкий уровень шума стереолитографов

Недостатки технологии SLA:

- Необходимость механически отделять стержневидную поддержку от созданных прототипов
- Необходимость в процессе окончательной УФ-засветки. Выращенную деталь необходимо промыть, после чего поместить в ультрафиолетовую камеру для окончательного отверждения.

Видео, демонстрирующее работу стереолитографического 3D-принтера:



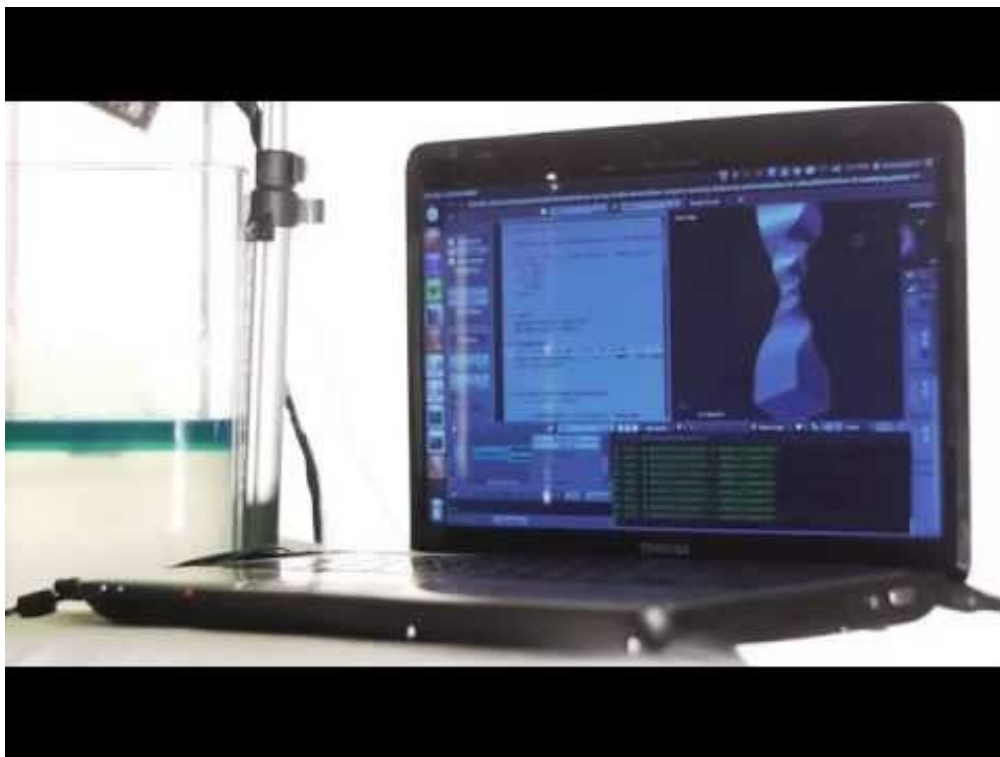


РАЗНОВИДНОСТИ СТЕРЕОЛИТОГРАФИЧЕСКИХ ПРИНТЕРОВ

Как и в случае с FDM-принтерами, SLA-принтеры поставляются в широком диапазоне с точки зрения габаритов, возможностей и стоимости. Профессиональные установки могут стоить десятки, если не сотни тысяч долларов и весить пару тонн, но быстрое развитие настольных SLA и DLP-принтеров приводит к постепенному снижению стоимости аппаратуры без потери качества печати.

Такие модели как *Titan 1* от компании *3Dinstruments* обещают сделать стереолитографическую 3D-печать доступной для небольших компаний и даже для бытового использования, имея стоимость в районе \$1000. *Form 1* от компании *Formlabs* уже доступен по отпускной цене производителя в \$3299 (рис. 36).

Разработчик же DLP принтера *Peachy* вообще намеревается преодолеть нижний ценовой барьер в \$100.



При этом стоимость фотополимерных смол остается достаточно высокой, хотя средняя цена за последнюю пару лет упала со \$150 до \$50 за литр.

Само собой, растущий спрос на стереолитографические принтеры будет стимулировать рост производства расходных материалов, что будет вести к дополнительному снижению цен.



Рис. 36 – Настольные стереолитографические принтеры *Formlabs Form 1*, *3Dinstruments Planet Uranus* и *Kudo3D Titan 1*

Лазерная стереолитография позволяет создать достаточно прочные к внешнему воздействию предметы и в пределе может выдерживать нагрузку около 90 МПа. Однако они неоднородны по своим свойствам. Дело в том, при отвердевании полимера имеет место процесс усадки, который, в зависимости от используемого состава олигомера может составлять от одного до трех процентов. Поскольку изготовление деталей ведется «послойно», по направлению этих слоев создается внутреннее напряжение конструкции, которое очень чутко реагирует на изгибы и удары. К примеру, по этой причине плоские объекты лучше создавать «стоя на ребре», а не «лежа» и по возможности дополнительно проектировать ребра жесткости.

Что касается температурного воздействия, то стереолитография позволяет создать предметы, выдерживающие нагрев до 100 °С, после кипячения в течение 60 минут предел прочности по нагрузке падает до 30 МПа. При 500 °С – полимер полностью теряет прочность и становится черным.

SLS – СЕЛЕКТИВНОЕ (ВЫБОРОЧНОЕ) ЛАЗЕРНОЕ СПЕКАНИЕ

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. SLS прототипирование позволяет исследовать аэродинамические характеристики гоночных автомобилей

ИСТОРИЯ

Технология выборочного лазерного спекания (SLS) была разработана Карлом Декардом и Джозефом Биманом из Университета Техаса в Остине в середине 1980-х. Исследования финансировались Агентством передовых оборонных исследовательских проектов США (DARPA). Впоследствии, Декард и Биман были вовлечены в компанию *DTM*, образованную для продвижения технологии SLS на рынок. В 2001 году *DTM* была выкуплена конкурирующей

компанией *3D Systems*. Последний из патентов по технологии SLS был заявлен 28 января 1997 года. Его срок действия истек 28 января 2014 года, что делает технологию общедоступной.

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

ТЕХНОЛОГИЯ

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 с помощью одного или нескольких лазеров. По завершении сканирования рабочая платформа опускается, и наносится новый слой материала. Процесс повторяется до образования полной модели (рис. 37).

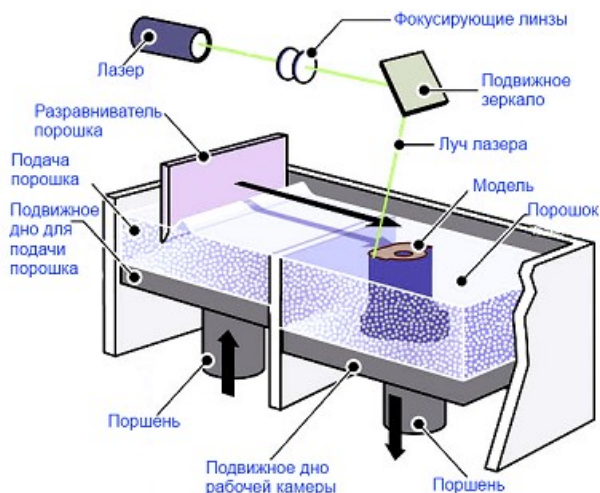


Рис. 37 – Принцип работы SLS принтеров

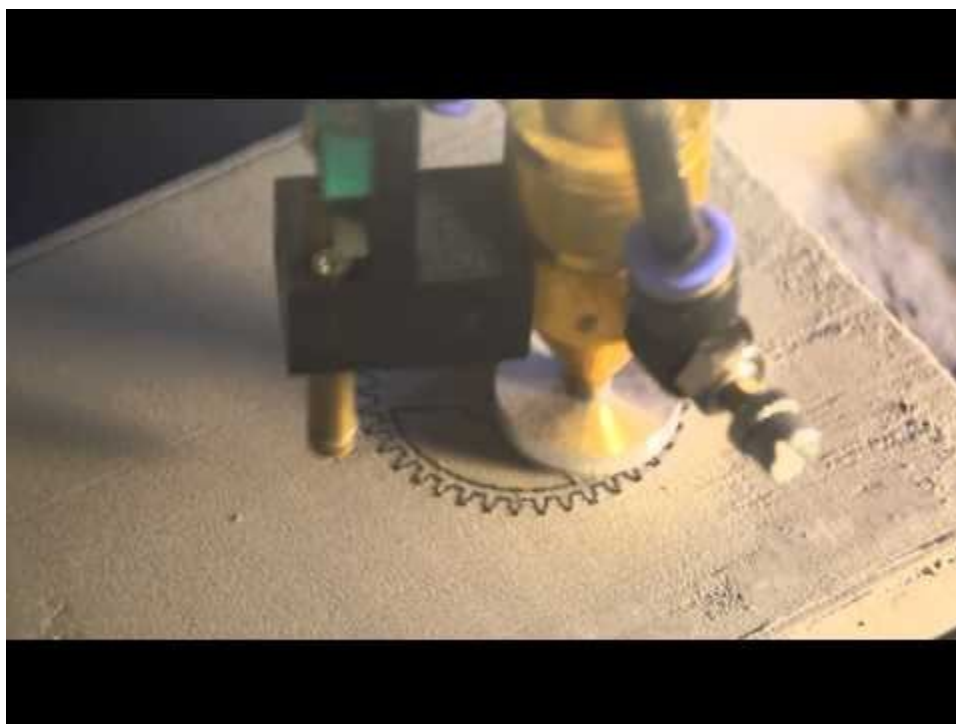
Эта технология с одной стороны, кардинально отличается от метода послойного наплавления, с другой стороны, имеет много общего. Как и там, модель создается послойно на основе компьютерного описания. Однако ключевым принципом здесь является применение порошка, а не плавящейся нити. Порошок напыляется равномерным слоем по всей площади, после чего

лазер запекает только те участки, которые соответствуют сечению модели на этом слое на этой высоте.

Итак, технология состоит из двух параллельных процессов: вначале подготавливается ровный тонкий слой порошка по всей возможной площади. Здесь не обойтись без валика, подающего и разравнивающего порошок, как каток. После этого включается мощный лазер и запекает те области, которые соответствуют срезу воображаемого объекта. Затем модель опускается вниз на расстояние, равное толщине слоя, и алгоритм повторяется, пока процесс не дойдет до самой верхней точки модели.

Как и следует ожидать, существует много вариантов на каждом этапе такого производства. Существует два алгоритма запекания: в одном случае плавят только те участки, которые соответствуют границе перехода, в другом — плавят по всей глубине модели. Кроме того, само запекание может варьироваться по силе, температуре и длительности.

Важная особенность выборочного (селективного) лазерного спекания — отсутствие необходимости в поддерживающих структурах, так как излишек окружающего порошка по всему объему не дает модели разрушиться, пока окончательная форма еще не обретена и не достигнута прочность целевого объекта.



Последний этап — финишная обработка. Например, погружение в специальную печь для выжигания технологических полимеров, которые нужны на этапе спекания, если использовались порошки композитных металлов. Также возможна полировка для удаления видимых переходов между слоями. Технологии и материалы непрерывно совершенствуются и, благодаря этому, этап финишной обработки минимизируется.

Специфика технологии позволяет создавать детали практически неограниченной сложности из различных материалов

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 SLA или FDM, SLS не требует построения опорных структур. Навесные части модели поддерживаются неизрасходованным материалом. Такой подход позволяет добиться практически неограниченной геометрической сложности изготавливаемых моделей.

МАТЕРИАЛЫ И ПРИМЕНЕНИЕ

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. Некоторые SLS устройства используют однородный металлический 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.

Технология SLS получила широкое распространение по всему миру благодаря способности производить функциональные детали сложной геометрической формы (рис. 38). 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 (рис. 39).



Рис. 38 – Компания New Balance использует технологию SLS при создании обуви для профессиональных атлетов



Рис. 39 – Использование SLS-технологии печати полимерным порошком для создания предметов искусства

Сфера применения 3D-печати методом SLS обширна: детали силовых установок, авиастроение, машиностроение, космонавтика (рис. 40).

Основные игроки рынка SLS-машин — *EOS* (Германия) и *3D Systems* (США). Они же предлагают серийные установки для создания самых больших объектов: 730x380x580мм и 550x550x750мм соответственно (рис. 41).

Однако в 2011 году в китайском университете Хуачжонг была построена самая большая в мире SLS-машина, способная синтезировать объекты размером 1200x1200мм.

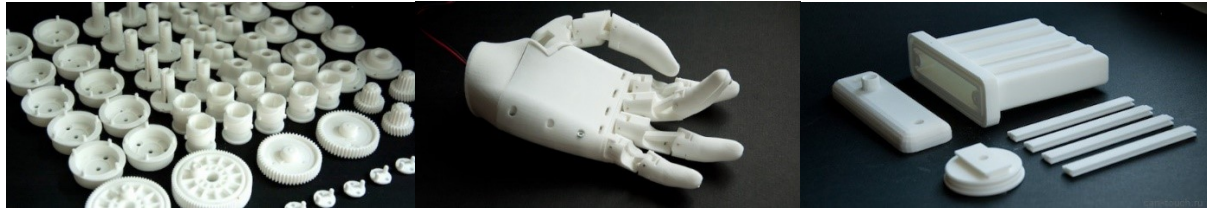


Рис. 40 – Различные детали, изготовленные методом SLS. Материал: Белый полиамид (PA2200). Принтер: EOSINT P395 Размер камеры: 340 x 340 x 620 мм Толщина слоя: 120 мкм



Рис. 41 – Промышленные SLS-принтеры EOS FORMIGA P100 и 3D Systems sPro 60 HD-HS



LOM – ПРОИЗВОДСТВО ИЗДЕЛИЙ ПОСЛОЙНЫМ ЛАМИНИРОВАНИЕМ

LOM (Laminated Object Manufacturing) – изготовление слоистых моделей методом ламинирования (рис. 42).

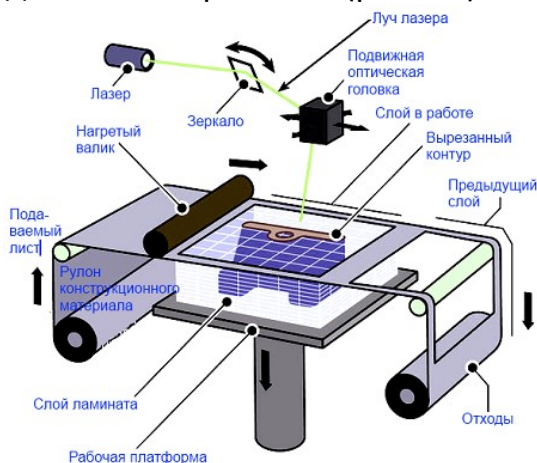


Рисунок 42 – Схема создания прототипа по LOM-технологии

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

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

ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ LOM-ТЕХНОЛОГИИ

Эта технология появилась одной из первых, в 1985 году. Ее изобретатель – Михайло Фейген, предложил ее за год до появления патента на другой метод 3д-печати – стереолитографию.

С тех пор она развивалась в нескольких компаниях: первоначально развитием данной технологии занялась фирма Helisys of Torrance, которая в 1998 г. получила на нее патент US5730817, однако, в 2000 году предприятие прекратило свое существование. Преемником этой компании стала Cubic Technologies, которая существует по сей день.

Также этой технологией занималась всемирно известная компания 3D Systems, где был выпущен LOM-принтер Invision LD, пока в 2007 году его не перекупила израильская фирма Solido. После этого она стала называться Solido SD 300. Сегодня эта компания уже не существует.

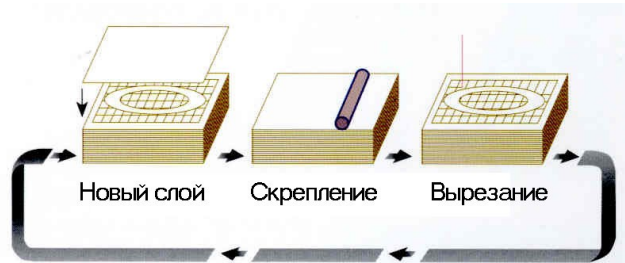
Наконец, ирландская компания Mcor Technologies в 2013 году на всемирной выставке SolidWorks World 2013 представила потрясающий LOM 3D-принтер, позволяющий печатать полноцветные трехмерные детали из обычной офисной бумаги. И у этого устройства, кажется, есть все шансы на успех и признание.

ТЕХНОЛОГИЯ 3D-ПЕЧАТИ МЕТОДОМ ЛАМИНИРОВАНИЯ

Процесс 3D-печати производится посредством связи принтера с персональным компьютером. Для начала работы необходимо иметь трехмерное изображение на ПК. В принтере установлены специальные листы, которые могут быть практически из любого материала от обычной бумаги до керамики. Все зависит от модели 3d-принтера. Но чаще всего им является обычная полимерная пленка, так как имеет наименьшую цену и толщину от 0,15 мм, что влияет на точность деталей полученного изделия.

В местах, где склеивание не требуется, происходит нанесение специального вещества – антиклея, при помощи фломастеров и карандашей, имеющих диаметр от 0,3 до 6 мм. После этого наносится следующий слой пленки и посредством валика, который прокатывается по ним, производится давление и нагрев. Это приводит к спеканию (ламинированию) двух слоев между собой. Далее, лазером или специальным ножом прибор обрезает все лишние детали и процесс повторяется.

Суть технологии LOM состоит в следующем:



1. Материал из рулона или отдельным листом подается на платформу рабочей зоны, и “раскатывается” по ней разогретым до нужной температуры и под необходимым давлением роликом, склеивая (ламинируя) слой.
2. Далее, по траектории, определенной в слайсере (программном обеспечении 3D-принтера, разбивающем математическую CAD/CAM-модель на слои), материал разрезается лазером (или ножом), образуя первое сечение изделия.
3. Оставшийся вокруг и внутри сечения материал надрезается дополнительно или заштриховывается для более легкого удаления по окончании печати.
4. После чего, платформа рабочей зоны вместе с первым слоем опускается вниз. Ролон материала проворачивается и поверх первого слоя накладывается следующий слой материала, нижняя часть которого покрыта клеем (в зависимости от используемого материала). А там где используется листовой материал, накладывается новый лист.
5. Процесс повторяется необходимое количество раз, после завершения которого удаляются отходы материала.

По завершении процесса полученную деталь надо забрать из 3D-принтера и очистить от обрезков (рис. 43). Далее можно произвести дополнительную механическую обработку: шлифование, вскрытие лаком, покраска.

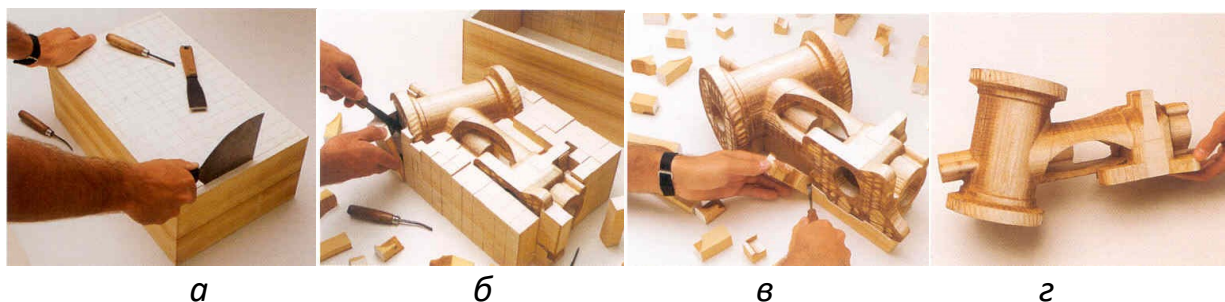


Рисунок 43 – Пост-обработка детали, изготовленной методом ламинирования: *а* – ламинированный блок снимается с платформы LOM-установки; *б* – с объекта снимается обойма для освобождения кубиков ненужного материала; *в* – кубики легко отделяются от поверхности объекта; *з* – поверхность объекта шлифуется, полируется или окрашивается

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ LOM

Хотя технология имеет много преимуществ, в числе которых значится и низкая стоимость производства, цена 3D принтеров, работающих по принципу многослойного моделирования, пока далека от общедоступности и находится на отметке около 10 000\$. Но производители этого оборудования (компании Solidimension Ltd, Mcor Technologies Ltd), продолжают разработки наиболее эффективных устройств, которые бы могли стать доступными широкому кругу потребителей.

Скорость печати является одним из главных конкурентных преимуществ технологии. В процессе моделирования нет необходимости в преобразовании жидких полимеров в твердое состояния или в спекании порошкообразных материалов, готовый объект не нужно подвергать термической пост-обработке. Лазеру во время построения модели методом LOM не нужно сканировать всю поверхность каждого сечения, поэтому детали с толстыми стенами производятся так же быстро, как и с тонкими стенками. Технология LOM особенно выгодна для производства больших и громоздких деталей, которые часто встречаются в аэрокосмической и автомобильной промышленности.

Коммерческая доступность различных листовых материалов дает пользователям широкое поле для экспериментов с характеристиками готовых объектов, позволяя гибко изменять толщину, высоту и другие параметры. Например, бумага является самым простым и наименее дорогим материалом для 3D печати, при этом готовые объекты могут похвастаться хорошей жесткостью и по своим свойствам вполне сравнимы с фанерой.

Единственными недостатками LOM можно считать необходимость держать расходные материалы подальше от влаги, а также то, что технология несколько уступает по точности и уровню детализации методам печати SLA или SLS.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Теоретически в подобной технологии могут использоваться самые различные материалы, такие как:

- пластики;
- композиты;
- металлическая фольга или тонкие металлы;

- керамика;
- обычная или ламинированная бумага;
- полимерная пленка.

Практически же все эти материалы могли использоваться только в экспериментальных моделях и промышленных образцах, численность которых часто не превышала десяти экземпляров. Большое распространение получили только те 3D-принтеры, которые обладали хорошими показателями цена-качество, обычно это настольные устройства для домашнего использования и недорогие промышленные экземпляры.

Наиболее доступными аппаратами для создания изделий методом ламинирования являются 3D-принтеры фирмы *Mcor Technologies*.



Рисунок 44 – 3D-принтер *Mcor Technologies Mcor IRIS*

3D-принтер компании Mcor IRIS (рис. 44) способен печатать модели высокого качества и самой широкой палитрой – до 1 миллиона цветов на любых поверхностях, в том числе на фасках и боковых деталях. При этом, основной расходный материал – это обычная чистая офисная бумага формата A4, что сводит к минимуму эксплуатационные затраты. Поскольку трёхмерные принтеры *Mcor IRIS* используют бумагу и основанный на воде клей для создания трехмерных моделей, система является очень экологичной, чистой, безопасной и «недорогой». Цена такого принтера на Российском рынке составляет 3,5 – 4 млн.руб.

3D принтер Mcor ARKe (рис. 45) – новейшее решение для объемной трехмерной полноцветной печати с использованием обычной офисной бумаги в качестве основного расходного материала.



Рисунок 45 – 3D-принтер *Mcor Technologies Mcor ARKe*

В отличие от других «промышленных» 3D принтеров, представленных в линейке Mcor, ARKe – относительная компактная модель, габариты 3D-принтера 875 x 580 x 600 мм. Как и 3D-принтер *Mcor Iris*, новый 3D-принтер *Mcor ARKe* способен производить полностью цветные 3D-модели с детализованной раскраской, и разрешением 4800 x 2400 DPI. Цена 3D-принтера *Mcor ARKe* (а она составляет сумму порядка 1 млн.руб.) включает специализированное мобильное приложение от *Mcor Technologies*, с помощью которого пользователь сможете удаленно запускать 3D-печать и следить за работой 3D-принтера с планшета и смартфона. Стоит также отметить, что в комплект поставки с цветным 3D-принтером *Mcor ARKe* бесплатно входит управляющее программное обеспечение *Mcor Orange* для платформ MAC и Windows. *Mcor Orange* – это менеджер 3D-печати с возможностью сохранения пользовательских настроек, формирования заданий на 3D-печать, удаленного управления и мониторинга. Оригинальное программное обеспечение *Mcor Technologies* позволяет пользователям полностью контролировать свои проекты 3D-печати.

СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЛАМИНИРОВАНИЯ

Данный метод 3D-печати может применяться с успехом в таких областях действительности:

- Архитектура. Изготовление макетов зданий и различных сооружений, которые могут использоваться как для дипломных работ, так и в работе строительных организаций (рис. 46).



Рисунок 46 – Применение LOM-технологии для изготовления макетов

- Медицина. Изготовление прототипов протезов, костей, черепов и внутренних органов по результатам компьютерных исследований организма (рис. 47).



Рисунок 47 – Модель черепа, изготовленная по LOM-технологии

- Образование. Визуализация любых сооружений, геометрических фигур, химических соединений, географических моделей рельефа с целью повышения качества восприятия преподаваемого предмета (рис. 48).



Рисунок 48 – Макет здания, изготовленный по LOM-технологии

- Искусство. Изготовление скульптур и объемных картин (рис 49).



Рисунок 49 – Предметы искусства, изготовленные по LOM-технологии

- Сувенирная продукция (рис. 50).

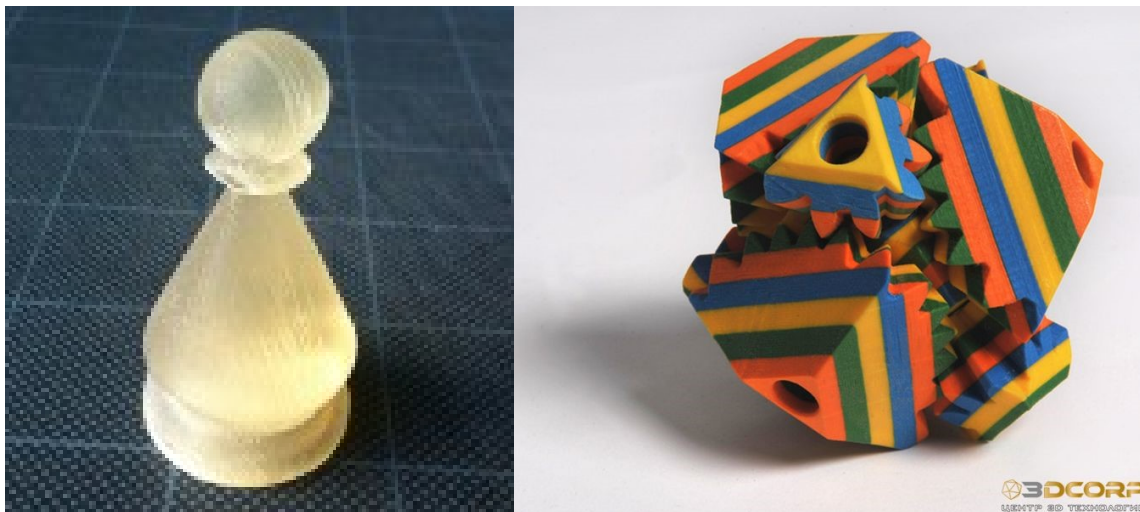


Рисунок 50 – Сувенирная продукция, изготовленная по LOM-технологии
Промышленность. Моделирование механизмов и прототипов (рис. 51).



Рисунок 51 – Изготовление моделей промышленных объектов по LOM-технологии

- Хобби. Авио-, авто-, судомоделирование и прочее (рис. 52).

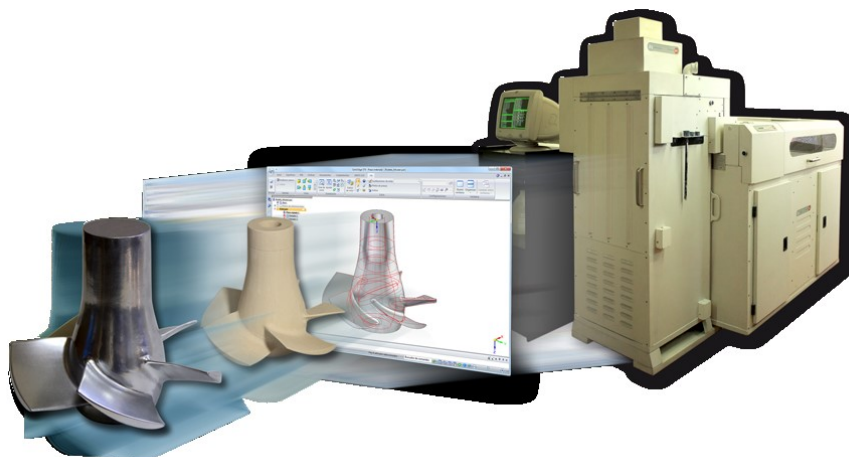


Рисунок 52 – Использование LOM-технологии в моделировании

СТОИМОСТЬ ИЗДЕЛИЙ

При использовании недорогих материалов, таких как пленки или бумага стоимость изделий, изготовленных подобным методом, будет сравнительно недорогой – около 15-30 руб. за см. куб.

Многое будет зависеть от типа 3D-принтера и используемого метода печати, положения деталей в пространстве, стоимости расходных материалов, толщины слоев.

Для снижения себестоимости продукта можно принять меры, направленные на удешевление продукции, например, изготовление деталей по частям с одновременным «выращиванием» нескольких деталей. При работе над крупными изделиями это может существенно сэкономить как деньги, так и время на их создание.

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ LOM 3D-ПЕЧАТИ

Преимущества:

- низкая себестоимость продукции;
- использование широко распространенных материалов;
- сравнительно высокая точность изготовления объектов, от 0,3 мм;
- на некоторых LOM-принтерах есть возможность сразу изготавливать цветные модели.

Недостатки:

- Недостаточно высокая прочность изделий вдоль направления слоев. Есть риск расслоения.

- Малая распространенность, небольшой выбор моделей 3D-принтера.
- Повышенная шероховатость поверхности



MJM – ТЕХНОЛОГИЯ МНОГОСТРУЙНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Технология многоструйного моделирования (MJM) – фирменный метод аддитивного производства, запатентованный компанией *3D Systems*. Технология используется в линейке профессиональных принтеров *ProJet*. Полученные изделия могут быть использованы в экспериментах, при функциональном тестировании, производстве основных шаблонов, прямого по изготавливаемым моделям для отраслей энергетики, транспорта, бытовых товаров, здравоохранения и т.п., при изготовлении форм.

ПРОЦЕСС

Технология многоструйного моделирования сочетает черты таких методов 3D-печати, как струйная трехмерная печать, моделирование методом послойного наплавления и стереолитография. Построение слоев производится с помощью специальной печатной головки, оснащенной массивом сопел (рис. 53). Количество сопел в существующих моделях принтеров варьируется от 96 до 448.

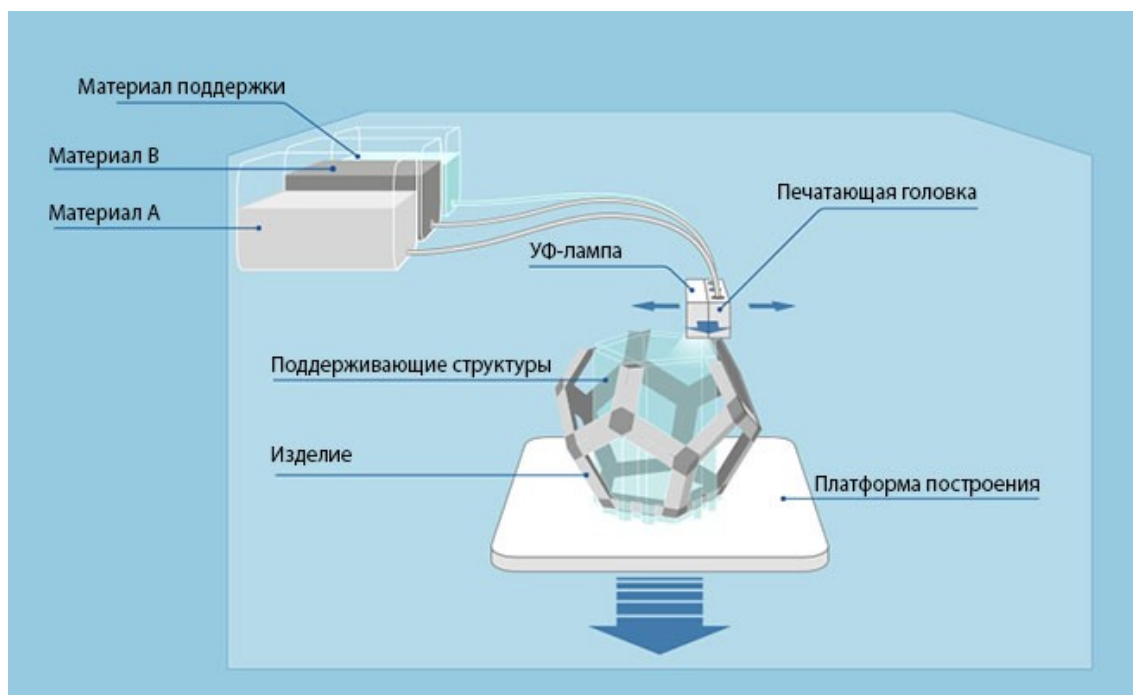


Рисунок 53 – Принцип 3D-печати по технологии MJM

Печатающий блок движется вдоль рабочей поверхности и наносит слой жидкого полимера. Следом за печатным блоком следует УФ-лампа, которая засвечивает только что нанесенные частицы материала, в результате чего тот затвердевает, формируя заданное изделие.

Основной материал (воск, фотополимерная смола) распыляется в соответствии с заданным алгоритмом слой за слоем, каждый из которых закрепляется при помощи ультрафиолетовой лампы. Поддерживающий материал заполняет пустоты и помогает сохранить целостность конструкции печатаемого объекта. В случае использования вспомогательных восковых структур, по окончании печати готовая модель помещается в печь (встроенную или отдельную) и нагревается до температуры порядка 60 °С для выплавки воска.

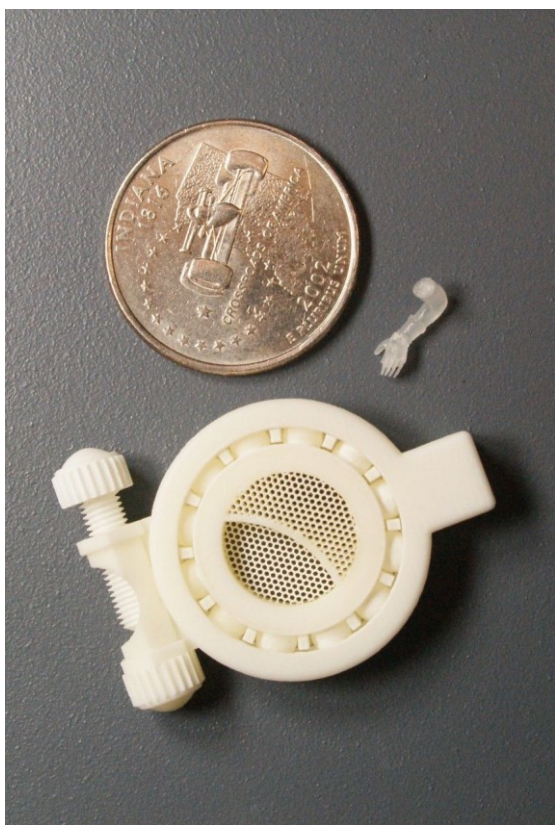


Рисунок 54 – Технология MJM позволяет осуществлять высокоточное прототипирование с высоким уровнем детализации

Технология позволяет добиваться исключительно высоких показателей точности (рис. 54), сравнимых с лазерной стереолитографией – минимальная

толщина наносимого слоя может составлять 16 микрон, а разрешение печати в горизонтальной плоскости достигает 750x750x1600 DPI.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ MJM

В целом процесс MJM похож на работу струйного принтера, но только позволяет создавать полноценные трехмерные объекты, которые отличаются хорошими физическими свойствами и прекрасным качеством поверхности. Метод многоструйного моделирования позволяет создавать объекты со сложной геометрией и толщиной слоя до 16 микрон.



Рисунок 55 – Примеры моделей, созданных по технологии MJM

В отдельных случаях для 3D-печати используют особый прозрачный или полупрозрачный пластик, который способен выдержать механические воздействия и высокие температуры свыше 100 °C (рис. 55). Также для печати в MJM-принтерах активно используется специальный медицинский пластик для производства качественных имплантатов.

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

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

Принтеры *ProJet* используют ассортимент материалов марки *VisiJet* (рис. 56), включающий в себя воски и фотополимерные смолы с различными механическими свойствами. Так, *VisiJet DentCast* используется в качестве отливочного воска в стоматологии, *VisiJet X* служит в качестве альтернативы популярному ABS-пластику, *VisiJet Crystal* применяется для создания высокоточных литейных мастер-моделей и т.д.



Рисунок 56 – *VisiJet Pearlstone* - материал, применяемый для создания стоматологических мастер-моделей

Выпускаемый компанией *3D Systems* 3D-принтер *ProJet 3500 CPXMax* обладает высокой скоростью печати, центром управления с сенсорным экраном, а также поддерживает работу с планшетами, ноутбуками и смартфонами (рис. 57).



Рисунок 57 – 3D-принтер *3D Systems ProJet 3500 CPXMax*

Применяется для создания высококачественных моделей из воска: демонстрационных макетов и дизайн-моделей, прототипов и испытательных деталей, а также в серийном производстве форм для литья металлических деталей. Различные режимы работы 3D-принтера позволяют пользователю выбрать оптимальное соотношение скорость/качество для своих задач:

- HD (High Definition) - режим высокого качества, толщина слоя 33 мкм
- HDHiQ (High Definition/High Quality) - режим высокого разрешения, высокого качества, толщина слоя 33 мкм
- UHD (Ultra High Definition) - режим ультра высокого качества, толщина слоя 20 мкм
- XHD (Xtreme High Definition) - режим максимального качества, толщина слоя 16 мкм

Некоторые модели принтеров *ProJet* обладают повышенной разрешающей способностью и позволяют создавать высокодетализированные модели. Такая особенность очень важна при работе с мелкими деталями, например в ювелирной промышленности или при создании мелких механических деталей. Такие 3D-принтеры находят свое применение и в медицинской отрасли (например, создание слуховых аппаратов и пр.)



Рисунок 58 – 3D-принтер *3D Systems ProJet 5000*

Профессиональный 3D-принтер *ProJet 5000* обладает самой большой областью построения среди систем трехмерной печати MJM (рис. 58). Благодаря уникальному сочетанию размера, точности и легкости

использования этот 3D-принтер идеально подходит для изготовления больших и маленьких деталей превосходного качества из твердого пластика. 3D-принтер *ProJet 5000* предназначен для обеспечения максимальной производительности в условиях завода или офиса - может работать без участия оператора более 80 часов.

Достоинства и недостатки метода

К достоинствам технологии многоструйного моделирования можно отнести следующие моменты:

- достижимость очень малой толщины слоя (от 16 мкм) и разрешение построения поверхности (до 8000 dpi);
- возможность многоцветной печати и сочетания материалов с разными свойствами;
- принтеры могут быть достаточно компактными.

Среди недостатков технологии многоструйного моделирования следует отметить:

- требование создания поддержек для моделей с нависающими или горизонтально выступающими элементами, которые приходится тем или иным способом удалять;
- ограниченный выбор материалов для работы.



ТЕХНОЛОГИЯ **PolyJet**

Запатентованная технология *PolyJet* фирмы *Objet Geometries* (ныне *StrataSys*) работает по принципу послойного нанесения фотополимерных материалов на платформу с ультратонким слоем толщиной 16мкм. Управляет этим процессом интуитивно понятная программа *Objet studio™*.

Каждый слой фотополимера отверждается ультрафиолетом сразу после нанесения на платформу. Построенные модели не требуют дополнительного отверждения и могут сразу использоваться. Гелеобразный материал поддержек, специально наносимый для поддержки элементов сложной геометрии, легко удаляется с помощью воды или вручную.

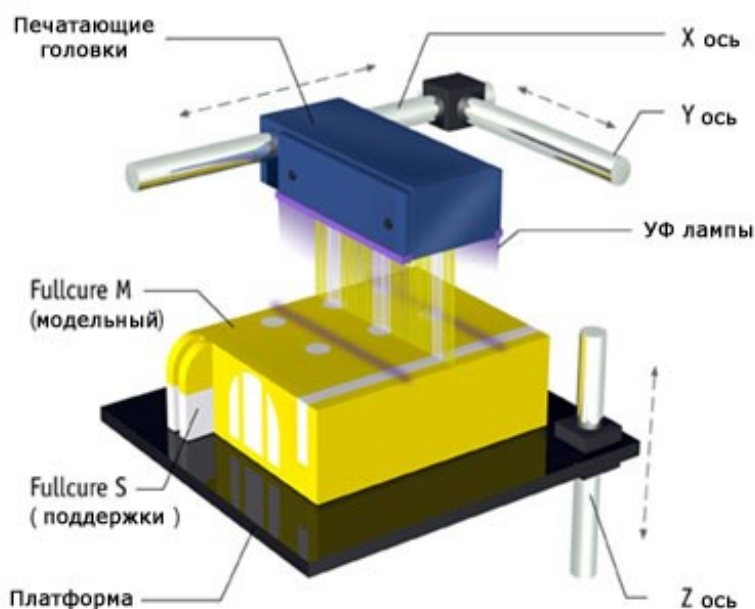


Рисунок 59 – Принцип печати по технологии *PolyJet*

3D печать по технологии *PolyJet* напоминает печать обычным струйным принтером. Но вместо напыления чернил на поверхность бумаги 3D принтеры типа *PolyJet* делают послойное напыление жидкого фотополимерного пластика на специальной внутренней площадке. Затем пластик затвердевает под воздействием ультрафиолетового излучения. Слои наслаиваются один на

другой, и, в результате, получается объёмная модель или прототип (рис. 59). Затвердевшую модель можно брать в руки и пользоваться ее сразу, не прибегая к дополнительной обработке. Помимо определённых материалов для моделирования, 3D-принтер использует гелеобразный опорный материал, разработанный специально для укрепления длинных выступов и элементов сложной геометрической формы. Он легко удаляется вручную или смывается водой. Технология 3D-печати *PolyJet* идеально подходит для быстрого прототипирования ввиду целого ряда преимуществ, к которым относятся: превосходное качество, скорость, высокая точность и широкий спектр используемых материалов.

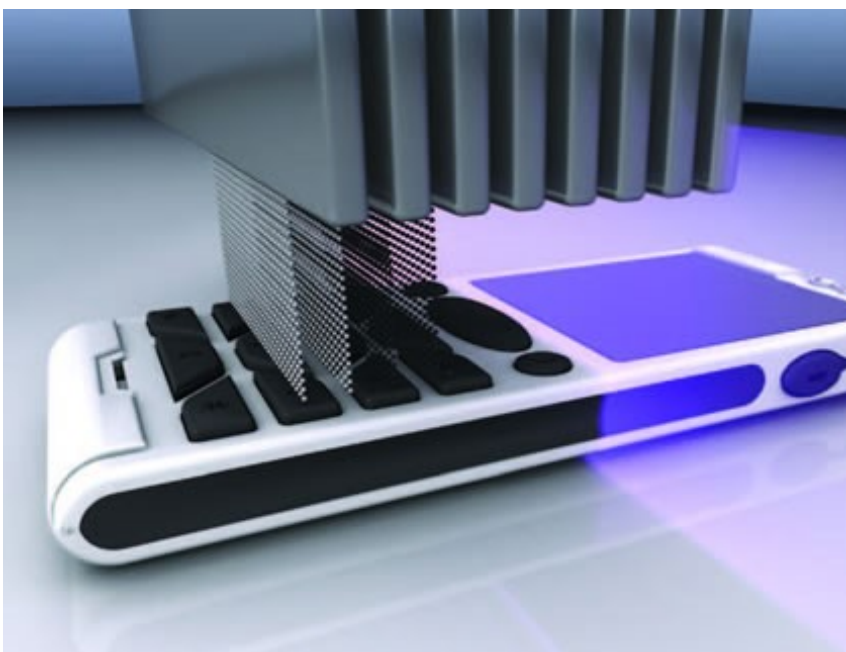


Рисунок 60 – Процесс изготовления изделия по технологии *PolyJet*

3D-принтеры, поддерживающие технологию *PolyJet*, обеспечивают наслоение толщиной до 16 микрон, с погрешностью не более 0,1 мм для гладких поверхностей (рис. 60). Это позволяет создавать модели сложной геометрической структуры с использованием тонких перемычек и стенок. Это единственная технология, которая поддерживает широкий спектр материалов, структура которых варьируются от мягкой до твёрдой, от прозрачной до совершенно непроницаемой. А благодаря уникальной технологии *Objet Connex* несколько материалов могут использоваться в слое одновременно на одном и том же участке.

ИСТОРИЯ ТЕХНОЛОГИИ

Впервые послойное нанесение фотополимерных материалов реализовала компания *Objet Geometries*. Представленная в начале 2000 года запатентованная технология *PolyJet™* позволила быстро изготавливать сложные модели любой формы.

С тех пор технология *PolyJet* постоянно совершенствуется. В настоящее время она используется не только на больших установках, но в настольных аппаратах с небольшой рабочей камерой. Также улучшается точность построения и растет экономическая эффективность. Учитывая отсутствие контакта с жидким фотополимером и удаление поддержек с помощью воды в установке *WaterJet, PolyJet* является идеальной технологией построения трехмерных объектов с возможностью применения в обычных офисных помещениях.

Сейчас компания *StrataSys* продолжает развитие технологии для поддержания статуса лучшего процесса высококачественного построения трехмерных объектов для решения любых задач во всех отраслях.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для 3D-принтеров, работающих по технологии *PolyJet* предлагается большой выбор различных материалов, включая:

- прозрачные материалы для производства моделей с высокой стабильностью размеров и гладкостью поверхности;
- жесткие непрозрачные материалы (семейство *Vero*) различных цветов, включая белый, серый, синий и черный;
- материалы, используемые в качестве альтернативы полипропилену, обладающие прочностью и долговечностью, необходимыми для создания сложных изделий оснастки различного оборудования;
- материалы, имитирующие свойства резины (семейство *Tango*), подходящие для создания широкого спектра деталей, обладающих скольжением и имеющих мягкие поверхности;
- высокотемпературные материалы (например RGD525), предназначенные для создания изделий, работающих в условиях повышенных температур, например с горячим воздухом или водой;

Диапазон выпускаемого оборудования для 3D-печати по технологии *PolyJet* чрезвычайно широк – от бытовых моделей принтеров до машин промышленного производства.

3D-принтер *StrataSys Objet24* – первая настольная система для печати реалистичных моделей с мелкими движущимися деталями, тонкими стенками и гладкими поверхностями под покраску (рис. 61).



Рисунок 61 – 3D-принтер *StrataSys Objet24*

Принтер *Objet24* обладает размером лотка 240 x 200 x 150 мм. *Objet24* идеально подходит для дизайнеров и инженеров, которые стремятся создать модели высокой точности для помощи в визуализации, тестирования на подгонку, проверки сборки и функционального применения. Принтеры *Objet24* используют матовый твердый материал белого цвета (*Vero WhitePlus*), который идеально подходит для трехмерного моделирования и прототипирования общего назначения. Этот фотополимер, сочетающий формоустойчивость и визуализацию с высокой степенью детализации, очень напоминает конечную продукцию. Его можно раскрашивать, сверлить, подвергать механической обработке.

Печать с помощью 3D-принтера *Objet24* предоставляет исключительное качество поверхностей модели и высокую детализировку. Толщина слоя построения объекта – 28 мкм, что соответствует разрешению по вертикальной оси 900 DPI. Разрешение по осям X и Y – 600 DPI – гарантия высокой детализации 3d модели. Кривые линии имеют крайне высокую

аппроксимизацию – ступеньки незаметны невооруженным глазом. Минимальная толщина 3D-модели составляет 0,6 мм. Принтер обладает сравнительно высокой производительностью. Максимальная скорость построения по оси Z – 10 мм в час. Легко удаляемые поддержки позволяют изготавливать 3D детали с любой геометрией. Наконец принтер обеспечивает возможность выполнить 3D-печать нескольких моделей сразу, а также 3D-деталей сложной конструкции за одну сессию 3D-печати без последующего соединения её частей. Розничная стоимость *Objet24* примерно 2 млн.руб.



Рисунок 62 – 3D-принтер *Stratasys Objet 260 Connex*

3D-принтер *Stratasys Objet 260 Connex* (рис. 62) – система трехмерной печати с уникальным набором возможностей. 3D-принтер *Objet 260V Connex* позволяет максимально быстро получить прототип проектируемого изделия с симуляцией физических свойств материалов реальной конечной модели. 3D-принтер *Objet 260 Connex* может строить 3D-модель, используя до 14 материалов с разными физико-химическими свойствами и цветом. Поскольку технология печати предусматривает дополнительный материал-поддержку, растворимую в воде, то возможна печать не только отдельных компонентов,

но и технологических узлов и механизмов в сборе. Стоимость 3D-принтера *Stratasys Objet 260 Connex* третьего поколения около 13 млн.руб.

3D-принтер *Stratasys Objet 1000* (рис. 63) – уникальный 3D-принтер, сочетающий в себе невероятные возможности и простоту в эксплуатации. Профессиональный 3D-принтер *Objet 1000* отлично подходит для создания прототипов, а также промышленных образцов больших размеров в масштабе один к одному. При этом в одной модели могут сочетаться материалы с различными механическими свойствами.



Рисунок 63 – 3D-принтер *Stratasys Objet 1000*

3D принтер *Objet 1000* обладает самым большим рабочим объемом (1000 x 800 x 500 мм) среди устройств для 3D-печати, выполненных по технологии *PolyJet* или ее аналогов. *Objet 1000* позволяет быстро и с высокой точностью выстраивать 3D модели любой сложности, подготовленные в системах CAD/CAM без каких-либо ограничений по геометрии. Данное 3D оборудование может выполнить любые задачи по проверке функциональности, собираемости и формы изделия.

В отличие от ближайших конкурентов 3D-принтеров серии *ProJet*, разработки *3D Systems*, *Objet 1000* подходит для изготовления не только маленьких и средних 3D-моделей, но и для выполнения 3D-печати прототипов размером в полную камеру устройства. Ни один из 3D-принтеров *ProJet*, печатающих из полимеров с вытапливаемой поддержкой не способен стабильно выращивать трехмерные изделия размером более 15 см без внутренних деформаций и искажений геометрии. Более того, 3D-принтер

Objet 1000 способен создать крупногабаритные корпуса из жесткого и эластичного материалов с переменным градиентным переходом. При этом не страдает детализация и точность.

В основе *Objet 1000* лежат эффективные технологии быстрого 3D-прототипирования *PolyJet* и *PolyJet Matrix*. 3D-принтер сочетает в себе способность строить модели из нескольких разных материалов сразу с непревзойденно высокой точностью 3D-печати. Благодаря технологии *Connex*, можно создать 3D-модель более чем из 120 различных материалов. Для 3D-принтера *Objet 1000* предусмотрены стандартные и специализированные материалы, например приближенные по свойствам к популярному в промышленности пластику ABS-класса. Стоимость 3D-принтер *Objet 1000* составляет примерно \$250,000.

ПРОЦЕСС *PolyJet Matrix*

Запатентованная технология *PolyJet Matrix* работает, используя два или три различных фотополимера в заранее заданном соотношении.

Многокомпонентный процесс может комбинировать материалы различными способами, позволяя использовать жесткие, эластичные, прозрачные и любые другие материалы.

Каждый материал доставляется в печатающий блок *PolyJet Matrix*, состоящий из нескольких печатающих головок. Идеально синхронизированные головки работают с каждым материалом, включая и материал поддержки.

Технология *PolyJet Matrix* контролирует каждое из сопел на каждой печатающей головке. Заранее выбранная композиция модельных материалов наносится с помощью соответствующих сопел согласно расположению и типу материала при полном контроле структуры получаемого материала и его механических свойств. Это позволяет получать любой композиционный материал, называемый «*Digital Material*» – цифровые материалы, с заранее заданными свойствами: прочностью, эластичностью, термостойкостью, твердостью и т.д.

Каждый слой фотополимера отверждается ультрафиолетом прямо после нанесения. Построенные модели не требуют дополнительного отверждения и могут сразу использоваться. Гелеобразный материал поддержки, специально

наносимый как опора для элементов сложной геометрии, легко удаляется с помощью воды или вручную.

Программное обеспечение *Objet Studio for Connex™* управляет процессом, работая с мультиматериальными STL-файлами. Также создаются файлы, содержащие в себе данные о соотношениях различных материалов, составных деталях и итоговых характеристиках моделей.

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ТЕХНОЛОГИИ

Преимущества технологии *PolyJet*:

- высокое качество: высочайшее разрешение с толщиной слоя 16 мкм позволяет получать гладкие, аккуратные модели с высокой детализацией;
- высокая точность: точный впрыск и свойства материала позволяют получать модели с высокой степенью проработки и тонкими стенками (600 мкм и меньше в зависимости от геометрии и материала);
- чистота метода обеспечивает возможность его применения в офисном помещении, отсутствие контакта с жидким фотополимером, легкое удаление поддержек и простая замена головок;
- быстрый процесс благодаря высокой скорости печати, возможности печати сразу нескольких деталей и отсутствию необходимости последующего до отверждения;
- удобство, легкость и быстрота замены модельного материала, широкий выбор материалов *Fullcure* позволяют получать детали с различной геометрией, механическими свойствами и цветом. при этом материал поддержек для всех типов модельных фотополимеров остается один и тот же;
- более высокая скорость печати в сравнении с технологией MJM.

Преимущества технологии *PolyJet Matrix*:

- позволяет создавать цифровые материалы в режиме реального времени – композиционные материалы, полностью соответствующие заданным механическим свойствам детали;
- возможность комбинирования материалов разного цвета, получая огромное количество вариантов цветов и оттенков для прототипов потребительских товаров, дизайна и других отраслей;
- сокращает время изготовления и постобработки при изготовлении многокомпонентных деталей, устраняя необходимость проектировать и изготавливать их по отдельности с последующей сборкой и/или склеиванием;
- серьезно сокращает риск возникновения ошибки при применении технологии многослойного литья благодаря возможности получения прототипов и проведения тестов на ранней стадии проектирования без использования собственно литьевого процесса.

Недостатки технологии *PolyJet*:

- высокая удельная себестоимость 3d печати;
- дорогостоящее оборудование для печати.



3DP – СТРУЙНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ 3D-ПЕЧАТИ

3DP расшифровывается как *Three-Dimensional Printing*, и переводится как трехмерная печать. Данная технология является одной из разновидностей систем аддитивного построения изделия по его CAD-модели и отличается от многочисленных схожих схем тем, что процесс осуществляется по принципу обычного принтера – через сопла печатающих головок (рис. 64). Таким образом, струйная трехмерная печать представляет собой естественное продолжение развития технологий обычной 2D-печати. На сегодняшний день она достигла достаточно хороших результатов, например, таких как цветная печать.

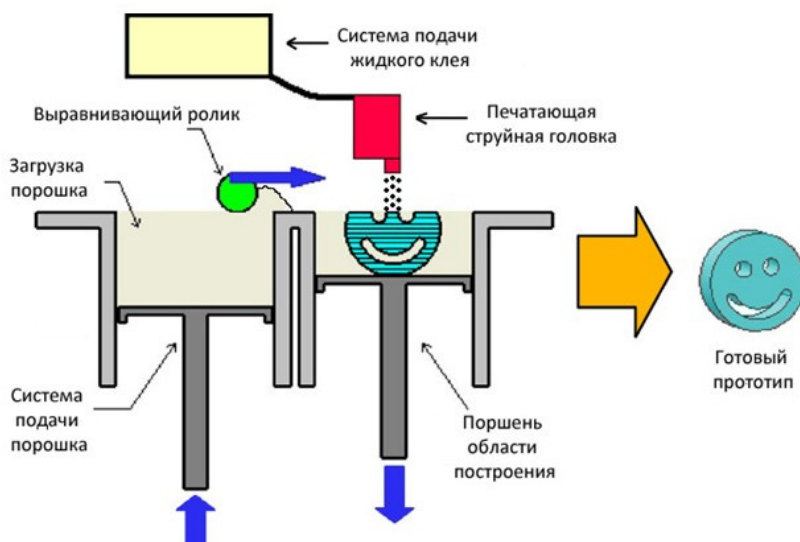


Рисунок 64 – Процесс 3D-печати по технологии 3DP

Струйная технология 3D-печати была разработана в Массачусетском Технологическом Институте, а первым и основным производителем оборудования стала компания *ZCorporation Inc.*

По своей сути, процесс выращивания 3D-детали по струйной технологии, напоминает обычную струйную печать. После отправки STL-файла на 3D-принтер, программа делит CAD-модель на множество горизонтальных сечений (слоев). Затем программа задает алгоритм работы печатающей головки (кстати головки адаптированы из струйных принтеров *Hewlett-*

Packard). В процессе работы такой движущейся печатающей головки, в гипсовый порошковый материал поступает клеящее вещество. В местах попадания клеящего вещества, порошковый материал застывает, образуя твердую поверхность (слой). Если упрощенно сравнить с обычной работой струнного 2D-принтера, то печать одного слоя – это ни что иное как печать одного листа бумаги. Следующий слой печатается сверху, на уже имеющийся слой. Постепенно, слой за слоем, распределяя клеящее вещество, 3D-принтер выращивает деталь из CAD-модели. После печати всех слоев, пользователь вынимает деталь из камеры, заполненной порошковым составом. Остается только тщательно очистить (обдуть) деталь от остатков порошка и покрыть жидким закрепителем (это делается кисточкой, вручную) для придания твердости детали.



Рисунок 65 – 3D-принтере от *ZCorporation ZPriner 650*

Необходимо отметить, что в цветном 3D-принтере от Z Corporation Z650 (рис. 65) установлены 4 струйные головки с чернилами основных цветов, так что полученная модель может воспроизводить не только форму, но и окраску получаемого прототипа. А в следующей модели - Z650 уже само клеящее вещество поставляется в различных основных цветах.



CLIP (CONTINUOUS LIQUID INTERFACE PRODUCTION)

Не так давно амбициозная канадская компания Carbon3D явила миру революционную 3D-печать – технологию CLIP (рис. 66). Если расшифровать название дословно, получим Continuous Liquid Interface Production. Печать на 3D-принтере от компании Carbon3D по этой технологии происходит в 100 (!) быстрее, чем на любых подобных устройствах, известных ранее. Хотя и печатью процесс появления объемного объекта назвать сложно. Новое изделие буквально рождается на ваших глазах поднимаясь вслед за платформой держателем из жидкого фотополимера.

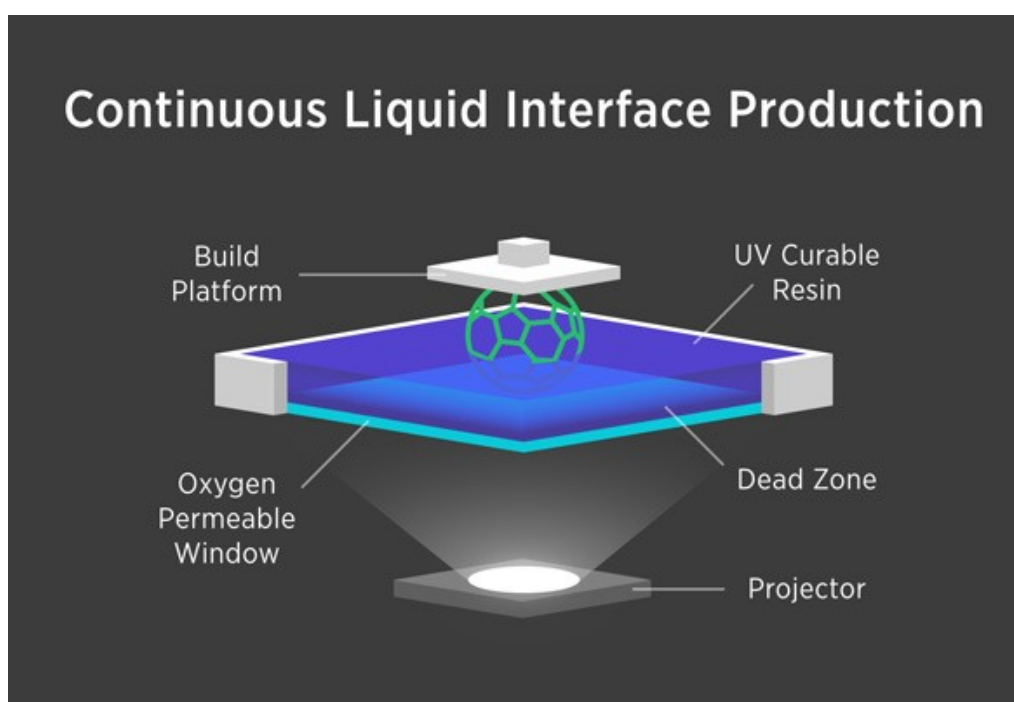


Рисунок 66 – 3D-печать по технологии CLIP

В отличие от всех существующих 3D-технологий, «печать» происходит не послойно, а непрерывно, путем взаимодействия ультрафиолетового излучения (способствует полимеризации) и кислорода (замедляет реакцию) с полимером. Это позволяет добиться высокой прочности готовой «копии» и точности ее воспроизведения в 10 микрон.

При использовании CLIP-технологии отмечается также очень высокое качество получаемых элементов и возможность использования широкого спектра полимеров для придания деталям разных свойств.

Чтобы создать объект нужной формы, система CLIP посылает в направлении емкости с полимером пучки света и дозы кислорода. Под действием света (ультрафиолета, если быть точным) полимер твердеет, а кислород не позволяет этому произойти слишком быстро. Управляя процессом подачи кислорода и ультрафиолета, можно формировать однородные, цельные структуры необходимой формы. Объект создается быстро и без малейшего намека на слоистость (рис. 67).

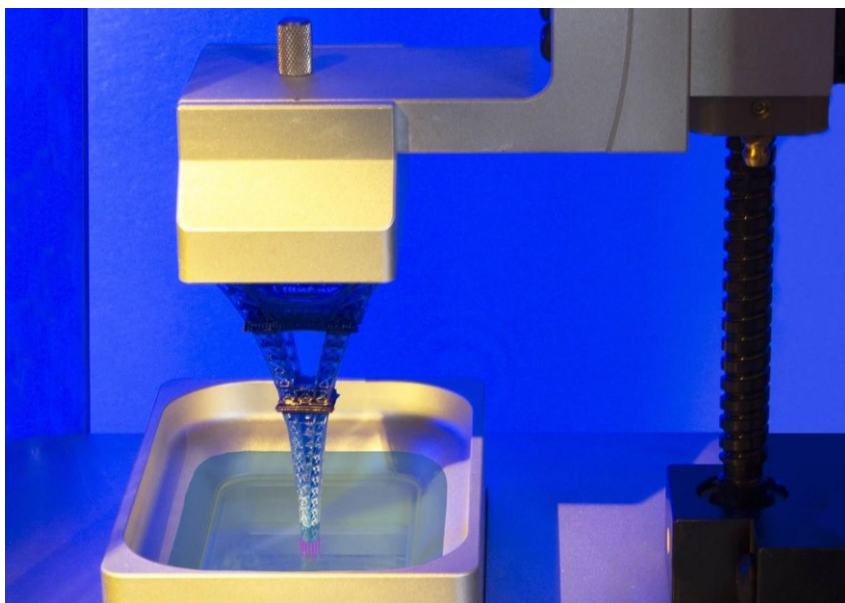
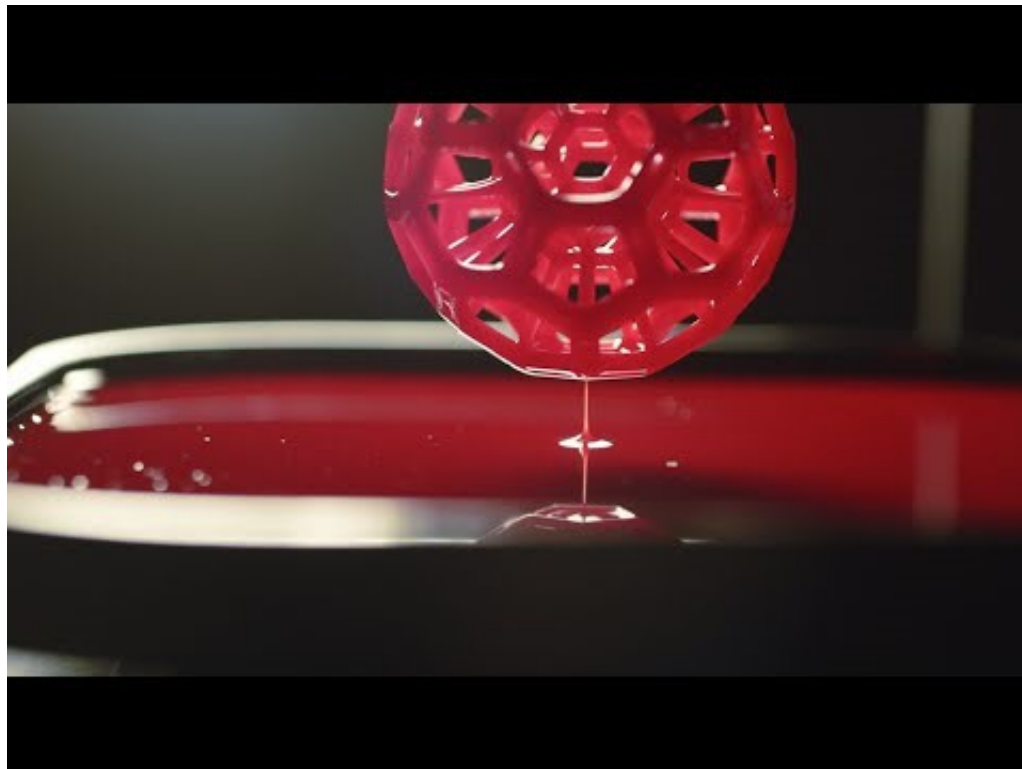
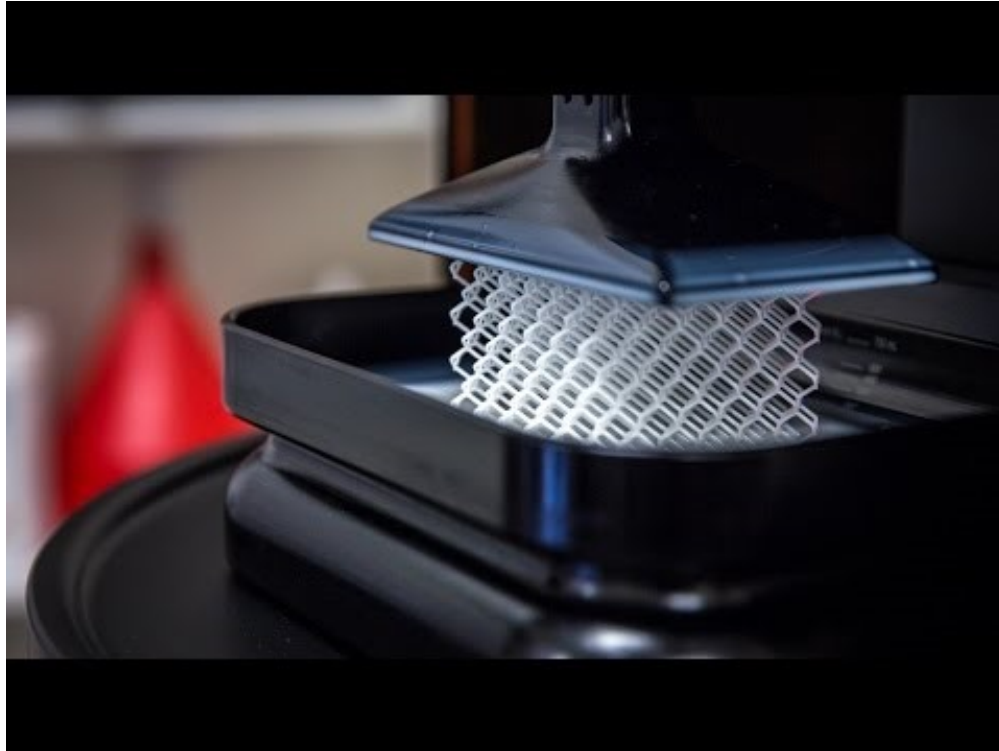


Рисунок 67 – Процесс создания изделия по CLIP-технологии

Работа технологии CLIP живьем впечатляет ровно так же, как и качество уже произведенных объектов. Создатели технологии надеются, что способность новой техники печати создавать очень маленькие гладкие объекты с высокой точностью и качеством наконец позволит открыть рынок для применения крошечных сенсоров, уместных в современных смартфонах и носимых гаджетах, а также при создании микро игл и других систем подачи лекарственных средств больным.





ВЫВОДЫ

Страны, сделавшие ставку на развитие аддитивных технологий, сегодня занимают наиболее выгодные позиции в мировом разделении труда. Эти технологии являются важным фактором в совершенствовании технологического процесса изготовления деталей сложных технических систем. По сути, это комплекс принципиально новых производственных процессов, в которых построение изделия происходит путем добавления (англ. add – добавлять) материала, в отличие от традиционных технологий, где деталь создается методом удаления лишнего.

Именно применение аддитивных технологий позволяет в полной мере реализовать основные принципы создания материалов нового поколения, заложенные в «Стратегических направлениях развития материалов и технологий на период до 2030 года», которые основаны на результатах фундаментальных и фундаментально-ориентированных исследований, полученных ведущими научно-исследовательскими организациями совместно с институтами РАН. Необходимо помнить главный принцип триединства аддитивного производства: материалы–технологии–конструкции, включая использование «зеленых» технологий при создании материалов и комплексных систем защиты, а также реализацию полного жизненного цикла с использованием IT-технологий – от создания материала до эксплуатации его в конструкции, диагностики, ремонта, продления ресурса и утилизации.

В высокотехнологичных отраслях промышленности для создания технических систем нового поколения требуется всесторонняя технологическая подготовка производства, с которой связаны циклы освоения и выпуска продукции, и в конечном итоге – эксплуатационная надежность и себестоимость изделия. Следует учитывать и специфику этих высокотехнологичных отраслей, которая состоит в том, что большая часть деталей изготавливается из труднообрабатываемых материалов. Это также является одной из причин повышения трудоемкости производства изделия и удорожания его себестоимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цветная струйная 3d печать (CJP) / 3DProfy, Сентябрь 19th, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/cvetnaya-strujinaya-3d-pechat-cjp/>
2. Технология 3d прототипирования. Что это такое? / 3DProfy, Апрель 2nd, 2015. Доступ: <http://3dprofy.ru/tekhnologiya-3d-prototipirovaniya-cto-eh-to-takoe/>
3. Обзор бесплатного ПО для 3d моделирования / 3DProfy, Декабрь 13th, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/obzor-besplatnogo-po-dlya-3d-modelirova/>
4. 3D сканеры обзор основных технологий / 3DProfy, Декабрь 13th, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/3d-skanery-obzor-osnovnykh-tekhnologij/>
5. Фотополимерный 3D-принтер / 3DProfy, Октябрь 21st, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/fotopolimernyj-3d-printer/>
6. 3D-принтеры FDM / 3DProfy, Октябрь 21st, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/3d-printery-fdm/>
7. Струйная трехмерная печать (3DP) / 3DProfy, Октябрь 21st, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/strujinaya-trehmernaya-pechat-3dp/>
8. Моделирование методом послойного наплавления (FDM) / 3DProfy, Октябрь 10st, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/modelirovanie-metodom-poslojnogo-na/>
9. Изготовление объектов методом ламинирования (LOM) / 3DProfy, Октябрь 10st, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/izgotovlenie-obektov-metodom-lamin/>
10. Стереолитография (SLA) / 3DProfy, Сентябрь 30th, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/stereolitografiya-sla/>
11. Цифровая светодиодная проекция (DLP) в 3D-печати / 3DProfy, Сентябрь 19th, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/cifrovaya-svetodiodnaya-proekciya-dlp-v-3d-pe/>
12. Многоструйное моделирование (MJM): технология настоящего и будущего / 3DProfy, Сентябрь 15th, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/mnogostrujnoe-modelirovanie-mjm-tekhno/>

13. Что такое 3D-печать? / 3DProfy, Сентябрь 15th, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/что-такое-3d-pechat/>
14. Промышленный 3d принтер / 3DProfy, Апрель 2nd, 2015. Доступ: <http://3dprofy.ru/promyshlennyij-3d-printer/>
15. Обзор принтера RepRap Prusa i3 / 3DProfy, Февраль 7th, 2015. Доступ: <http://3dprofy.ru/obzor-printera-reprap-prusa-i3/>
16. 3d принтер PrintBox3D One / 3DProfy, Февраль 7th, 2015. Доступ: <http://3dprofy.ru/3d-printer-printbox3d-one/>
17. Обработка распечатанных моделей после 3d печати / 3DProfy, Январь 8th, 2015. Доступ: <http://3dprofy.ru/obrabotka-raspechatannykh-modeleij-pos/>
18. 3D редакторы с поддержкой .stl / 3DProfy, Декабрь 13th, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/3d-redaktory-s-podderzhkojj-stl/>
19. 3D принтер PrintBox3D One — популярный российский 3d принтер / 3DProfy, Декабрь 13th, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/3d-printer-printbox3d-one-populyarnyj-rossijskij-3d-p/>
20. 14 способов борьбы с заворачиванием при 3d печати / 3DProfy, Декабрь 13th, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/14-sposobov-borby-s-zavorachivaniem-pri/>
21. Расходные материалы для моделирования методом послойного наплавления (FDM/FFF) / 3DProfy, Октябрь 21st, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/raskhodnye-materialy-dlya-modelirovan/>
22. Обзор современных 3D-принтеров / 3DProfy, Сентябрь 15th, 2014. Доступ: <http://3dprofy.ru/obzor-sovremennykh-3d-printerov/>

Учебное издание

ЛЯПКОВ Алексей Алексеевич

ПОЛИМЕРНЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

Научный редактор *доктор химических наук,
профессор М.С. Юсубов*


Компьютерная вёрстка *А.А. Ляпков*

**Зарегистрировано в Издательстве ТПУ
Размещено на корпоративном портале ТПУ
в полном соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета**



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru