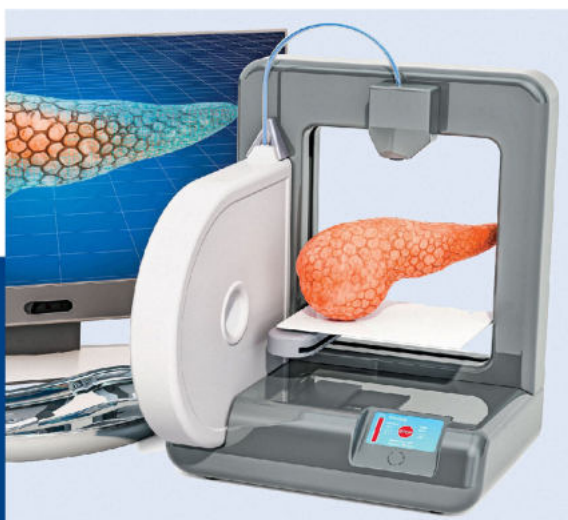


ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ

ПОЛИМЕРНЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

А. А. Ляпков
А. А. Троян



E.LANBOOK.COM

А. А. ЛЯПКОВ,
А. А. ТРОЯН

ПОЛИМЕРНЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
МОСКВА
КРАСНОДАР
2022

УДК 66
ББК 35я73

Л 97 Ляпков А. А. Полимерные аддитивные технологии : учебное пособие для вузов / А. А. Ляпков, А. А. Троян. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 120 с. : ил. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-8114-8708-0

В пособии рассматриваются возможности и тенденции развития современных методов 3D-печати полимерами. Показаны основные разновидности и особенности полимерных аддитивных технологий. Пособие подготовлено специалистами Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий и Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Пособие предназначено для магистров направления «Материаловедение и технологии материалов», «Химическая технология», слушателей курсов повышения квалификации, а также будет полезно бакалаврам, магистрам, аспирантам и инженерно-техническим работникам, связанным с получением и переработкой полимерных материалов.

УДК 66
ББК 35я73

Рецензенты:

Н. А. БАУМАН — кандидат технических наук, директор дирекции полиолефинов ООО НИОСТ (г. Томск);

А. В. БОРИЛО — кандидат химических наук, главный технолог Института химии нефти СО РАН (г. Томск).

Обложка
Ю. В. ГРИГОРЬЕВА

© Издательство «Лань», 2022
© А. А. Ляпков, А. А. Троян, 2022
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2022

ПРЕДИСЛОВИЕ

Пластмассы — материалы на основе органических синтетических или природных полимеров, из которых можно после нагрева и приложения давления формировать 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, улучшающие те или иные характеристики полимеров, или придающие им новые, специфические свойства. 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 имеется заготовка, от которой потом отсекается все лишнее, либо деформируется в изделие, то в случае с аддитивными технологиями из ничего (а точнее, из аморфного расходного материала) выстраивается новое изделие. В зависимости от технологии объект может создаваться слой за слоем, практически безотходно, и при этом получать различные свойства.

Общую схему аддитивного производства можно изобразить в виде следующей последовательности (рис. 1).



Рис. 1

Общая схема аддитивного производства

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, автомобильной и авиационной 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.

В XXI веке быстрое развитие функциональных материалов выдвинуло более высокие требования к производству. В отличие от традиционных производственных процессов субтрактивного производства, таких как сверление, фрезерование, распиловка, протяжка и т. д., 3D-печать, также известная как аддитивное производство (additive manufacturing — AM), позволяет напрямую

изготавливать трехмерные детали посредством последовательной укладки слоев материала, что дает практически неограниченные возможности для быстрого прототипирования. Оно имеет много таких преимуществ, как почти полную свободу дизайна, гибкость, сложность конструкции и высокую устойчивость. Почти все виды материалов, таких как металлы, керамика и полимеры, могут быть использованы в качестве сырья для 3D-печати при изготовлении различных изделий. Таким образом, 3D-печать охватывает широкий спектр областей включая биомедицину, машиностроение, авиацию и космонавтику, электронику и микроэлектронику.

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 (рис. 2).

Для таких отраслей, как авиастроение, важное преимущество — снижение веса изделий, получаемых за счет внедрения аддитивных технологий. Отдельные детали удается сделать легче на 40–50% без потерь в прочности.

Ежегодно мировой рынок аддитивных технологий демонстрирует рост в пределах 27–28%. Лидером по их внедрению считаются США — доля оборудования аддитивных технологий достигает 38%. В первой тройке также значатся Япония и Германия.

Национальный рынок аддитивных технологий пока отстает от мирового. Сегодня в России функционируют компании, занимающиеся прототипированием, или выпуском, бытовых 3D-принтеров. Большинство из них — небольшие фирмы без дорогостоящего оборудования. Установками достаточно высокого уровня располагают ФГУП «НАМИ», НПО «Салют», АБ «Универсал», НИИ

«Машиностроительные Технологии». Их мощностей достаточно для того, чтобы провести НИОКР.

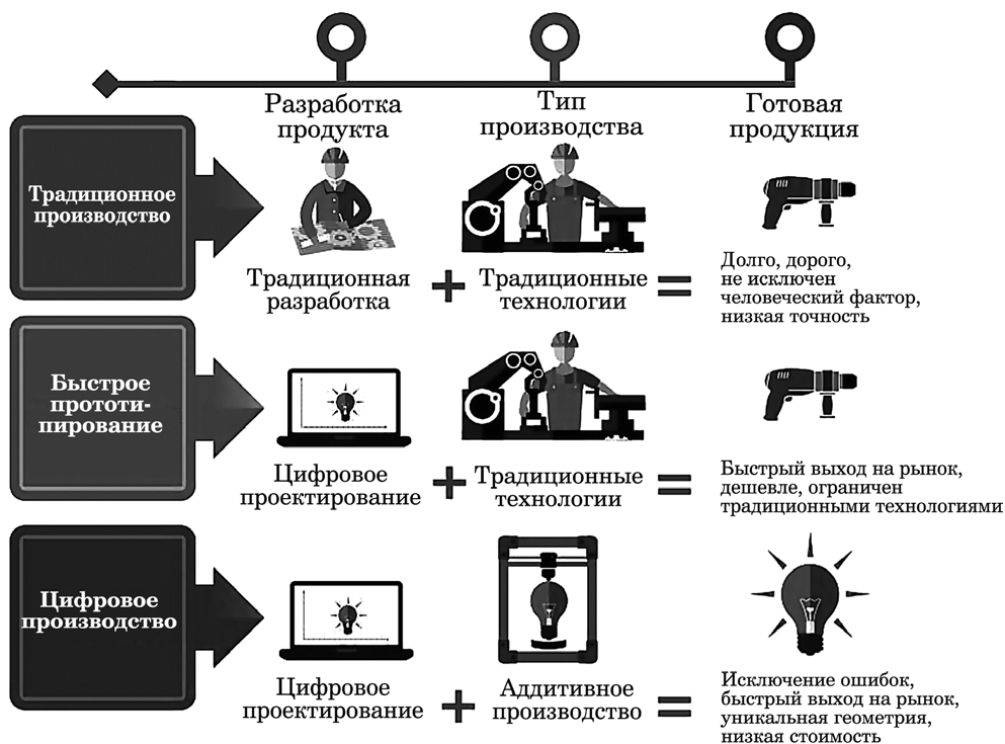


Рис. 2

Различия в традиционном и аддитивном производстве

Бурное развитие техники 3D-печати привело к появлению множества новых методов печати. В 3D-печати были приняты более продвинутые концепции для изготовления более быстрых дешевых и небольших систем печати. Как правило, все методы 3D-печати следуют базовому процессу аддитивного производства:

- 3D-моделирование с помощью программного обеспечения CAD, 3D-сканера или процедуры фотограмметрии;
- оцифровка трехмерной модели путем преобразования ее в файл STL;
- преобразование данных файла STL в файл G-кода, который содержит геометрическую информацию о каждом нарезанном двумерном слое из 3D-модели;
- печать материалов послойным способом.

В зависимости от способа нанесения 2D-слоев материала 3D-печать можно сгруппировать в четыре основные категории: (I) фотополимеризация; (II) экструзия; (III) порошковые технологии; и (IV) ламинирование (рис. 3).

Фотополимеризация зависит от упорядоченного поверхностного отверждения фотополимера, который состоит из фотоинициаторов, добавок и реакционно-способных мономеров/олигомеров. Стереолитография (SLA, DLP), струйная об-

работка материалов (MJM) и непрерывное производство в жидком интерфейсе (CLIP) являются четырьмя типичными методами 3D-печати фотополимеризации. SLA основан на сканировании одиночным лазерным лучом, в то время как DLP — это метод проецирования слоев, в котором используются фотомаски или цифровые микрозеркальные устройства (digital micromirror devices — DMD) для отверждения каждого 2D-слоя. CLIP-технология благодаря использованию кислородопроницаемой мембраны обеспечивает гораздо более высокую скорость по сравнению с обычной 3D-печатью. MJM сочетает технику струйной печати и процесс ультрафиолетового (УФ) отверждения для печати различными новыми материалами. Перспективный метод многофотонной полимеризации (MPP), который представляет возможность для отверждения фотополимера в любом положении ванны с помощью сверхбыстрого лазера, может достичь пространственного разрешения до 100 нм.



Рис. 3

Классификация различных методов 3D-печати полимерами

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, в которых в качестве материала используют полимеры:

- **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, самыми популярными и доступными из которых являются АБС-пластик (ABS) и полилактид (PLA). Изделия из пластика отличаются высокой прочностью, гибкостью, прекрасно подходят для тестирования продукции, прототипирования, а также для изготовления готовых к эксплуатации объектов (рис. 4).



Рис. 4

Изделия из пластика, созданные с помощью FDM 3D-печати

- **SLA** (сокращенно от Stereolithography) — лазерная стереолитография. Это отверждение жидкого фотополимерного материала под действием лазерного излучения. Эта технология аддитивного цифрового производства ориентирована на изготовление высокоточных изделий с различными свойствами (рис. 5).



Рис. 5

Изделия из пластика, созданные с помощью SLA 3D-печати

- **SLS** (Selective Laser Sintering) — селективное лазерное спекание полимерных порошков. С помощью этой аддитивной технологии можно получать большие изделия (рис. 6) с различными физическими свойствами (повышенная прочность, гибкость, термостойкость и др).



Рис. 6

Изделия из пластика, созданные с помощью SLS 3D-печати

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 или механической резки (рис. 7). Объ-

екты, производимые этим методом, обычно подлежат дополнительной механической обработке после печати. Толщина наносимого слоя напрямую зависит от толщины используемого листового материала.



Рис. 7

Изделия из пластика, созданные с помощью технологии LOM

- **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 (рис. 8).



Рис. 8

Изделия из пластика, созданные с помощью MJM 3D-печати

- **PolyJet** — отверждение жидкого фотополимера под воздействием ультрафиолетового излучения. Технология используется для получения прототипов и мастер-моделей с гладкими поверхностями (рис. 9).



Рис. 9

Изделия из пластика, созданные с помощью технологии PolyJet

- **3DP** (3D Printing) — струйная трехмерная печать. Эта аддитивная технология 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 (рис. 10).



Рис. 10

Модели, созданные с помощью технологии струйной печати 3DP

Печать трехмерных объектов с невероятной детализацией стала возможной благодаря использованию «двухфотонной литографии» — метода многофотонной полимеризации (МРР), который позволяет фабриковать структуры нанометрового размера (рис. 11).

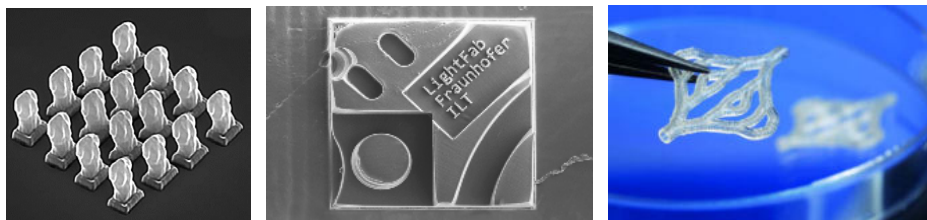


Рис. 11

Объекты, созданные с помощью технологии «двухфотонной литографии» МРР

В этом методе 3D-принтер использует жидкий фотополимер, который затвердевает точно в той точке, на которой сфокусировался лазерный луч. Фокальная точка лазерного луча движется сквозь фотополимер, направляемая зеркалами, и оставляет после себя линию твердого полимера шириной всего в несколько сотен нанометров. Столь высокое разрешение позволяет создавать хитросплетенные скульптуры размером не больше песчинок.

Помимо высокой детализации возможна и печать без опорных структур и даже во взвешенном состоянии: например, в двухфотонных литографических системах необходимая для отверждения интенсивность света достигается в точке пересечения фотонов с двух излучателей. Другими словами, по одиночке фотоны могут беспрепятственно проходить сквозь толщу материала, а при пересечении в заданных точках — возбуждать процесс полимеризации.

Столь впечатляющий прогресс в точности печати стал возможен благодаря соединению нескольких свежих идей. Прежде всего было чрезвычайно важно улучшить контроль над механизмом зеркал, которые находятся в постоянном движении во время печати.

Во-вторых, 3D-печать — это не только механика, не менее важную роль в общем успехе проекта сыграли химики. Не надо забывать, что, по сути, печать — это хорошо спланированный процесс управляемой полимеризации, в котором «инициатор», активируемый светом лазера, запускает цепную реакцию

полимеризации мономерных компонентов жидкого фотополимера. Но сам по себе «инициатор» не так банален, как может показаться. Это вещество активируется лишь при одновременном поглощении сразу двух фотонов, и этот весьма маловероятный процесс может произойти только в самом центре лазерного луча, где достигается наивысшая интенсивность излучения. Вероятность события уменьшается пропорционально четвертой степени расстояния от центра луча. Скорость активации «инициатора» и запускаемой им полимеризации также является определяющим фактором для общей динамики всего процесса. Именно такой высокоэффективный «инициатор», требующий для своей активации не один, а сразу два поглощенных фотона, был разработан специально для этого проекта группой химиков под руководством Роберта Лиски.

Двухфотонная полимеризация (ДФП) появилась в последние десятилетия как очень многообещающий метод создания трехмерных микроструктур, который имеет решающее значение в широком диапазоне областей, включая электронику, фотонику, микро/нанoeлектромеханические системы, биомедицинскую инженерию, биоинженерные архитектуры и микро/наножидкости. В ДФП фемтосекундный лазерный луч плотно фокусируется в смоле. Из-за оптической нелинейности поглощение света ограничено фокусным объемом лазерного луча, что позволяет реализовать произвольную 3D-печать. Сверхтонкая ширина линии ≈ 40 нм и относительно высокая производительность при скорости записи $1 \div 5$ см/с могут быть реализованы с помощью литографии ДФП (рис. 12).

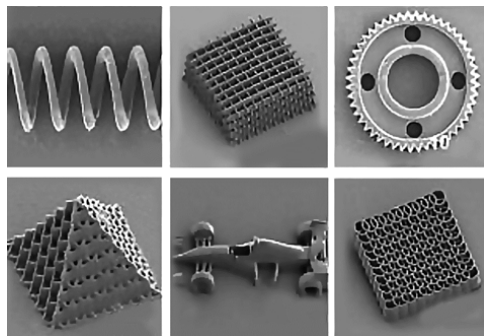


Рис. 12

Объекты, созданные с помощью технологии двухфотонной полимеризации ДФП

Кроме того, различные функциональные материалы, в том числе материалы на основе углерода, фотоизомеризуемые красители, полупроводниковые наночастицы, металлические наночастицы и магнитные наночастицы, могут быть объединены с литографией ДФП, чтобы разрабатывать функциональные 3D-архитектуры. Правильное выравнивание многослойных углеродных нанотрубок (Multi-Walled Carbon Nanotube — MWNT) в желаемых направлениях может быть реализовано с использованием техники ДФП. Однако при проведении ДФП трудно достичь как высокой концентрации MWNT, так и однородной дисперсии MWNT, поскольку MWNT склонны к образованию больших скоплений, вызванных сильными ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями между отдельными MWNT. Более того, линейное оптическое поглощение MWNT также

ограничивает максимальный уровень легирования MWNT в композитных смолах при использовании нелинейной литографии и ДФП. Даже относительно низкая концентрация загрузки MWNT приводит к улучшению характеристик композитных смол (рис. 13).

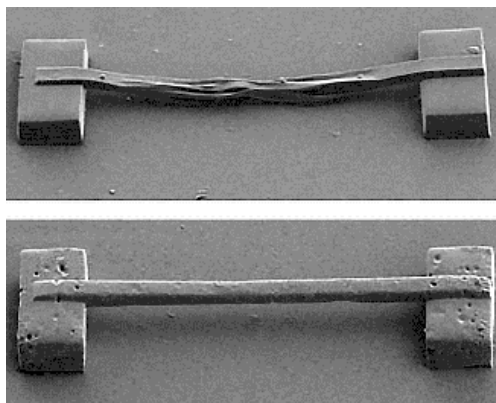


Рис. 13

Сравнение объектов без наполнителя (верхний рисунок) и с наполнителем — углеродными нанотрубками (нижний рисунок) напечатанных с помощью технологии ДФП

Ну и, наконец, — новейшая технология 3D-печати полимерами — **CLIP** (Continuous Liquid Interface Production) — технология непрерывного построения детали 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 (рис. 14).



Рис. 14

Новейшая технология 3D-печати полимерами (CLIP)

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 раз (!) быстрее, чем на любых подобных устройствах, известных ранее.

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°C и только некоторые — до 300°C. 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 основные 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), полипропилен (ПП), полистирол (ПС), поливиниловый спирт (ПВС), 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, 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 гетеро-

фазных 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, ПП, ПС, ПВХ и др.) перерабатывают в изделия экструзией, литьем под давлением, пневмовакuum-формованием и другими методами.

Изделия из реактопластов (термореактивных полимеров) получают формуустойчивость 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, хлоропреновые 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, так как 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 — *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°C) температурах, — *теплостойкие материалы*. К этой группе можно отнести ПА, ПЭТ, ПФО, ПК, полисульфон (ПСФ), ПТП, ПИ, фенопласты, аминопласты, кремнийорганические композиции и др.;
- пластмассы, способные работать при низких (ниже -40°C) 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 ПММА, 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 на основе других полимеров;
- *пластмассы для работы под воздействием ионизирующих излучений — радиационно-стойкие 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, грибовостойких 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°C) температуре: они главным образом работают в ненагруженном или в слабонагруженном состоянии при обычных или средних (до 50°C) 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 прочности при обычной и повышенной температурах и высокую температуру длительной эксплуатации под нагрузкой (выше 75°C). 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.

Кроме пластмасс общетехнического (ПЭ, ПП, ПС, ПВХ и др.) и инженерно-технического (ПА, ПК, поливинилацетали и др.) в отдельные группы принято выделять *термоустойчивые и высокопрочные конструкционные* (ПИ, ПАР и др.) и 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 пластмассы инженерно-технического назначения (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. 15).

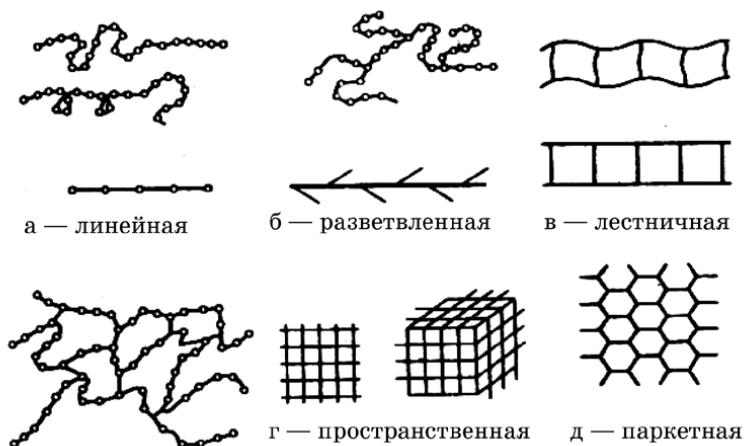


Рис. 15

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 по-

следовательно друг за другом. Пачки способны перемещаться относительно соседних элементов, так как они являются структурными элементами (рис. 16).

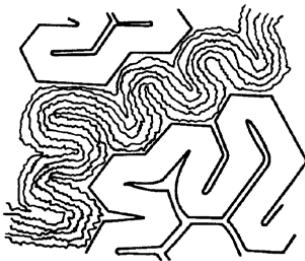


Рис. 16

Модель аморфного полимера с высокой организацией макромолекул в гибкие пучки (Печхольд)

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.

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. 17).

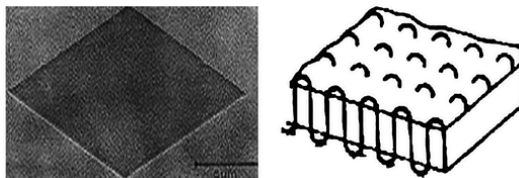


Рис. 17

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 $-\text{Cl}$, $-\text{F}$, $-\text{OH}$), 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 (или термореактивным).

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.

Радикальная полимеризация

Цепная полимеризация — наиболее распространенный метод получения высокомолекулярных соединений. Именно этим методом получают карбоцепные полимеры для пластмасс, искусственных волокон и синтетического каучука. При полимеризации мономеры взаимодействуют без выделения побочных продуктов, поэтому элементарный состав исходных и конечных продуктов одинаков.

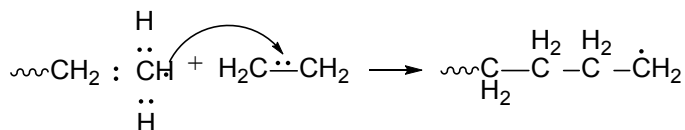
Для пластмасс и синтетических волокон наибольшее значение имеют продукты полимеризации непредельных углеводов — олефинов (этилена, пропилена) и их производных, т. е. карбоцепные полимеры. Примером такой полимеризации является синтез полиэтилена.

Полимеризоваться могут не только непредельные углеводороды, но и соединения с двойной связью между углеродом и другими атомами (кислородом, серой, азотом), например формальдегид. При полимеризации таких мономеров образуются гетероцепные полимеры.

Могут полимеризоваться и насыщенные соединения циклического строения, содержащие в цикле гетероатом, например окись этилена. Полимеризация происходит за счет размыкания цикла с образованием гетероцепного линейного полимера. Аналогично полимеризуются и более многозвенные циклические соединения, например ϵ -капролактамы.

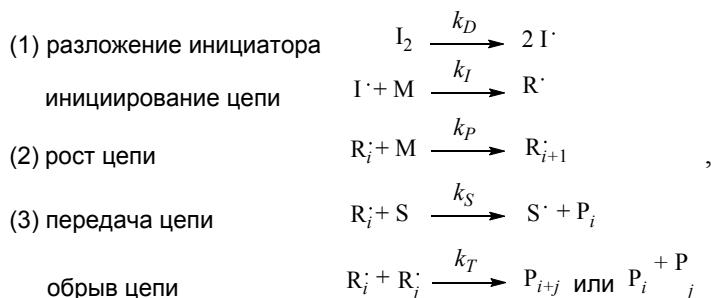
При цепной полимеризации макромолекулы полимера образуются в результате раскрытия кратных связей или циклов мономеров при действии на них активных центров, находящихся на концах растущих цепей. Существует три типа активных центров в цепной полимеризации — радикал, катион и анион, в соответствии с чем различают радикальную, катионную и анионную полимеризации.

Радикальной полимеризации подвержены исключительно соединения, содержащие двойные углерод-углеродные связи. В этом случае активным центром является атом, имеющий один неспаренный электрон. Такой атом (радикал) очень реакционноспособен из-за тенденции неспаренного электрона к образованию пары со вторым электроном. Соединения, содержащие π -связь, являются подходящими объектами для реализации этой тенденции, поскольку электроны π -связи связаны гораздо более слабо по сравнению с σ -связью. Поэтому радикал достаточно легко отбирает один из электронов π -связи с тем, чтобы образовать пару электронов, т. е. новую σ -связь:



Описанный выше химический акт приведен на схеме применительно к полимеризации этилена; химические связи атомов, участвующих в реакции, для наглядности представлены электронными парами. Радикал, расположенный на конце растущей цепи, называется *радикалом роста*, а его реакция с мономером — основная реакция полимеризации — *реакцией роста цепи*. Из схемы видно, что присоединение мономера к радикалу роста сопровождается регенерацией активного центра на конце цепи — атома углерода с неспаренным электроном.

Радикальная полимеризация включает три стадии: иницирование (1), рост (2) и обрыв цепи (3).



где $\text{R}_i \cdot$ — радикал i -й цепи; I_2 — инициатор; M — мономер; S — агент передачи цепи; P — полимер.

Радикальная полимеризация является одним из распространенных методов синтеза полимеров. По радикальному механизму полимеризуется большинство мономеров, имеющих двойные связи углерод — углерод. Активность мономера в реакции полимеризации зависит от его химической природы. Известно, что осуществить радикальную полимеризацию простейшего мономера (этилена) довольно трудно. Это объясняется низкой реакционной способностью двойной связи у симметричной молекулы этилена.

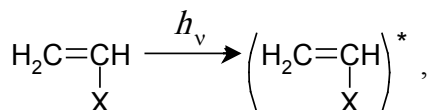
Наличие у атомов углерода, образующих двойную связь, каких-либо заместителей приводит к поляризации двойной связи и ее ослаблению.

Фотохимическое инициирование

Некоторые ненасыщенные соединения (метилловые эфиры акриловой и метакриловой кислот, стирол, винилацетат, винилхлорид и др.) легко полимеризуются на свету. Наибольшее активирующее действие на реакцию полимеризации оказывают ультрафиолетовые лучи, обладающие наибольшей энергией:

	Длина волны, нм	Энергия, нДж
Ультрафиолетовые	10...400	50...2,5·10 ⁻³
Видимые	400...800	2·10 ⁻¹ ...5·10 ⁻³
Инфракрасные (ближние)	800...10000	2,5·10 ⁻³ ...2·10 ⁻⁴

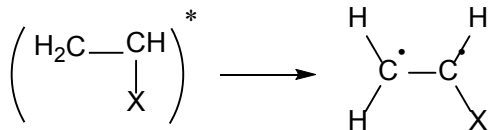
Ультрафиолетовые и видимые лучи могут смещать электроны, а инфракрасные лучи способны вызвать только колебания атомов в молекуле. Полимеризация происходит в результате поглощения молекулой мономера кванта световой энергии и перехода молекулы в возбужденное состояние:



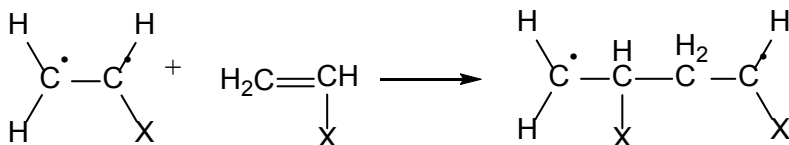
где $h\nu$ — квант света.

Для фотохимического инициирования полимеризации ненасыщенных соединений на практике используют ультрафиолетовый свет с длиной волны 250...360 нм.

Возбужденная молекула мономера переходит в бирадикал, по-видимому, в результате мономолекулярного превращения



Этот бирадикал реагирует с мономером



В ходе полимеризации бирадикал превращается в полимерный монорадикал, как и в случае термической полимеризации.

Известно, что суммарная энергия активации полимеризации равна

$$E_P = \frac{E_I}{2} + \left(E_G - \frac{E_T}{2} \right) = 83...92 \text{ кДж/моль},$$

где E_I — энергия активации инициирования, равная в случае радикального инициирования около 125,7 кДж/моль; E_G — энергия активации роста цепи; E_T — энергия активации обрыва цепи. При фотохимическом иницировании $E_I = 0$, тогда $E_P = E_G - \frac{E_T}{2}$ и составляет 21...33,5 кДж/моль. Поэтому фотополимеризацию можно проводить при таких низких температурах, при которых нельзя инициировать радикальную полимеризацию другими методами. Например, при действии ультрафиолетового света хлористый винил полимеризуется при 35°C, то есть при температуре, при которой не происходит ни термической полимеризации, ни полимеризации под влиянием химических инициаторов.

Скорость образования радикалов при фотохимическом иницировании, то есть скорость инициирования будет равна

$$r_I = 2 \cdot f \cdot I_{abs},$$

где I_{abs} — количество поглощенных квантов света; $2 \cdot f$ — количество радикалов, образующихся при действии одного кванта света и иницирующих полимеризацию (или квантовый выход реакции инициирования). Теоретически каждый квант света дает 2 радикала, способных инициировать полимеризацию, однако часть образующихся радикалов гибнет, не давая начала полимерной цепи.

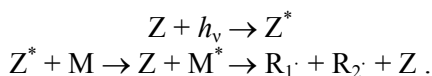
Для процесса фотополимеризации справедливы зависимости:

$$n = \frac{r_G}{r_T} \text{ или } n = \frac{r_G}{r_I},$$

где n — степень полимеризации.

Однако прямое облучение мономера малоэффективно, поскольку обычное стекло обычно не пропускает УФ-свет в области, соответствующей его поглощению мономером (π – π^* -переход, 200–220 нм), или пропускает его в незначительной степени.

В том случае, когда мономер не поглощает прошедший свет, необходимо использовать *фотосенсибилизатор* (Z) — соединение, передающее энергию возбуждения другим молекулам:



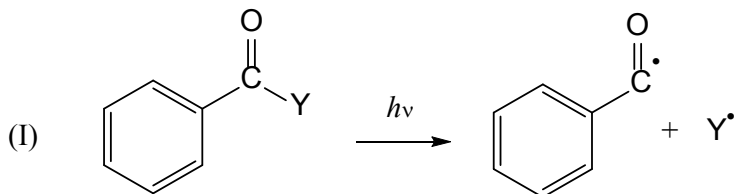
Применение в качестве фотосенсибилизаторов красителей позволяет использовать для фотоиницирования видимую область света.

В практических целях фотополимеризация обычно проводится в присутствии *фотоинициаторов* — веществ, распадающихся в требуемой обла-

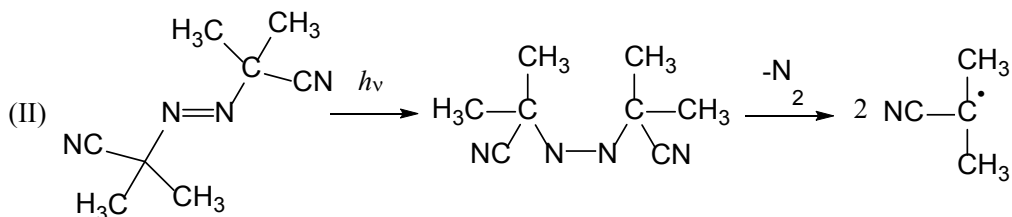
сти УФ-спектра с достаточно высоким квантовым выходом. Идеальный фотоинициатор должен отвечать следующим критериям:

- во-первых, разлагаться при облучении источником света с определенной длиной волны, которая не поглощается мономером;
- эффективность инициатора должна быть высокой и близкой к единице;
- лучше, если при этом образуется один тип радикалов.

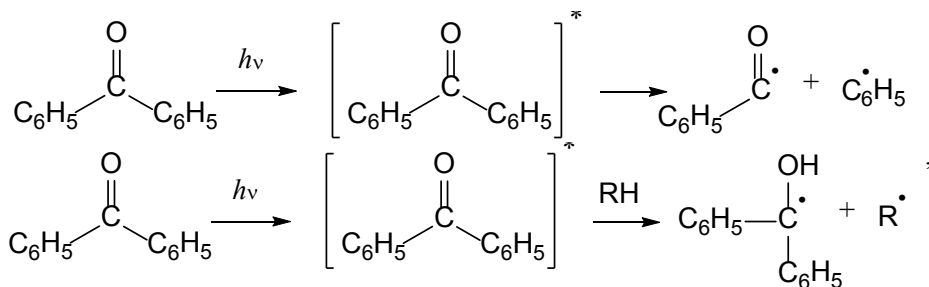
По механизму действия фотоинициаторы можно разделить на два типа: распадающиеся на радикалы при облучении, например соединения, содержащие бензольную группу (ацетофеноновый тип — I) и взаимодействующие с соинициаторами с образованием радикалов (азосоединения — II).



Механизмы действия азосоединений имеют особенности, которые заключаются в изменении при облучении своей конфигурации с *цис*- на *транс*-. Это имеет особое значение при импульсном воздействии света.

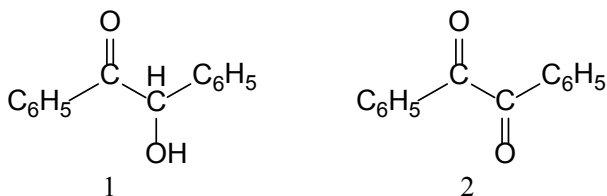


Наиболее эффективными фотоинициаторами являются ароматические кетоны и их производные благодаря достаточно широкой области поглощения УФ-спектра и высокому квантовому выходу радикалов. Считается, что ароматические кетоны претерпевают фотохимическое превращение по двум направлениям:



последнее из которых реализуется лишь в присутствии доноров водорода.

В промышленности в качестве фотоинициаторов используют бензоин (1), бензилкеталь (2) и их многочисленные производные:



Зная количество поглощенных фотонов (I_{abs}) и облучаемый объем (V), можно определить концентрацию первичных радикалов (C), образующихся при монохроматическом облучении светом:

$$C = 2 \cdot \Phi \cdot \frac{I_{abs}}{V},$$

где Φ — первичный квантовый выход.

Количество же поглощенных фотонов можно вычислить по известному выражению Ламберта — Бера:

$$I_{abs} = \frac{E_{abs}}{E_{\lambda}} \cdot (1 - 10^{-\varepsilon \cdot C \cdot D}),$$

где E_{abs} — поглощенная энергия; E_{λ} — энергия одного моля фотонов при длине волны λ ; ε — коэффициент экстинкции; C — концентрация; D — оптическая плотность.

Фотополимеризация используется для нанесения полимерных покрытий непрерывным способом на металл, дерево, керамику, световоды, в стоматологии для отверждения композиций зубных пломб. Особенно следует отметить применение фотополимеризации в фотолитографии, с помощью которой изготавливают большие интегральные схемы в микроэлектронике, а также печатные платы (матрицы) в современной технологии фотонабора, позволяющей исключить использование свинца.

Основное преимущество фотоинициирования в процессах полимеризации — возможность точного определения начала и завершения процесса через продолжительность воздействия света. Кроме того, скорость разложения инициатора практически не зависит от температуры, в то время как интенсивность облучения вносит решающий вклад.

Существенным недостатком фотоинициирования является быстрое падение его эффективности с увеличением толщины облучаемого слоя вследствие поглощения излучения. По этой причине фотохимическое инициирование эффективно при возбуждении полимеризации в достаточно тонких слоях, порядка нескольких миллиметров.

Процесс полимеризации

Фотополимерные смолы имеют в своем составе акриловые мономеры, поливиниловый спирт, поливинилциннаматы, полиизопрен, полиамиды, эпоксидные смолы, полиимиды, стирольные блок-сополимеры, бутадиен-нитрильный каучук и т. д. Кроме того, в состав фотополимерных смол входят фотосенсибилизаторы (фотоинициаторы), наполнители, пластификаторы, красители и другие ком-

поненты. Полимеры обычно выполняют роль связующего и определяют характер обработки смол, а также окончательные физические свойства отвержденных композиций фотополимера.

Фотополимерная смола — это смесь мономеров и олигомеров, молекулы которых состоят из одной или более (до нескольких тысяч) коротких углеводородных цепочек. Она имеет все компоненты финального пластика, но еще не полностью полимеризована. Когда такая смола подвергается воздействию ультрафиолетового излучения, молекулы олигомеров под воздействием активных радикалов, образующихся при распаде фотоинициаторов, образуют более длинные и, соответственно, более прочные структуры.

Если полимеризуются мономеры, содержащие не одну, а две и более двойных углерод-углеродных связей (функциональных групп), то процесс роста полимерных цепей приводит к образованию разветвленных макроцепей, которые образуют пространственные (трехмерные) сшитые макромолекулы. Такие структуры отличаются от несшитых макромолекул физикохимическими и механическими свойствами. Они теряют растворимость в растворителях, не плавятся при повышенных температурах, твердость их заметно выше, чем несшитых полимеров. Сшитые пространственные полимеры могут образовывать так называемые взаимопроникающие сетки, в которых переплетаются растущие макромолекулы.

При увеличении степени превращения (конверсии) исходного мономера в полимер имеет место увеличение вязкости реакционной среды вследствие увеличения концентрации полимера, что приводит к ограничению подвижности макрорадикалов и скорости их рекомбинации. Поэтому общая концентрация радикалов в системе возрастает, и скорость полимеризации увеличивается, что проявляется в виде так называемого гель-эффекта, который происходит чаще всего на глубоких стадиях полимеризации. Однако при соблюдении некоторых условий гель-эффект может иметь место уже на начальных стадиях полимеризации.

Даже начальная (до полимеризации) вязкость фотополимерных смол значительно больше, чем у мономер-олигомерных смесей, а диффузионные процессы в ней затруднены. Поэтому процесс полимеризации даже при небольших конверсиях мономеров (на начальных стадиях) происходит в условиях гель-эффекта. Следствием трехмерной пространственной радикальной полимеризации является изменение физического состояния реакционной смеси. Агрегация полимерных цепей приводит к фазовому разделению, синерезису системы с образованием микрообъемов сильносшитых сетчатых макромолекул и раствора несшитых мономеров и других компонентов фотополимерных смол (синерезис — самопроизвольное уменьшение объема студней или гелей, сопровождающееся отделением жидкости).

После того как прореагировало достаточное количество мономеров и олигомеров, получается твердая деталь. Однако для полного завершения процессов полимеризации и сшивки напечатанную деталь необходимо подвергнуть дополнительной обработке УФ-излучением в специальной камере.

Основы реологии расплавов полимеров

Полимеры могут находиться в трех физических состояниях: стеклообразном, высокоэластичном и вязкотекучем. 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, так как 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 термореактивных 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.

Рассмотрим призму длиной l_0 , к торцу которой приложено растягивающее напряжение σ_0 (рис. 18). 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:

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

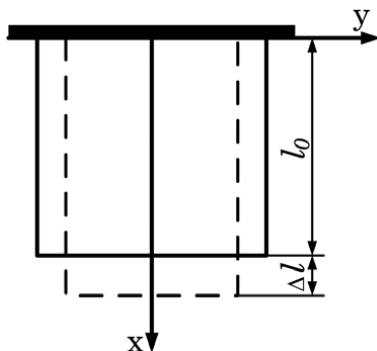


Рис. 18

Растяжение прямоугольной призмы

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. 19).

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:

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

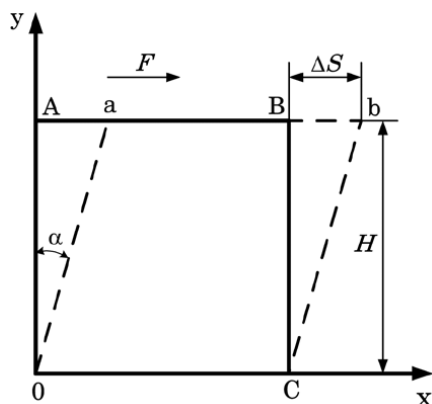


Рис. 19

Сдвиг прямоугольной призмы

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:

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

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. 20).

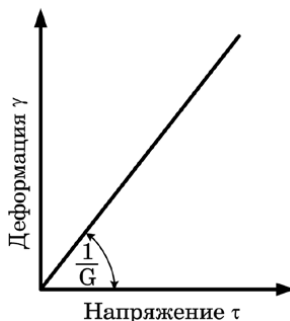


Рис. 20

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 рисунке 21.

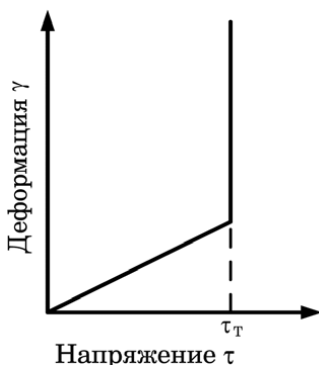


Рис. 21

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, то есть 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.

Из диаграммы для аморфного полимера (рис. 22) видно, что в низшем температурном интервале вещество находится в стеклообразном состоянии, то есть 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 пластичным.

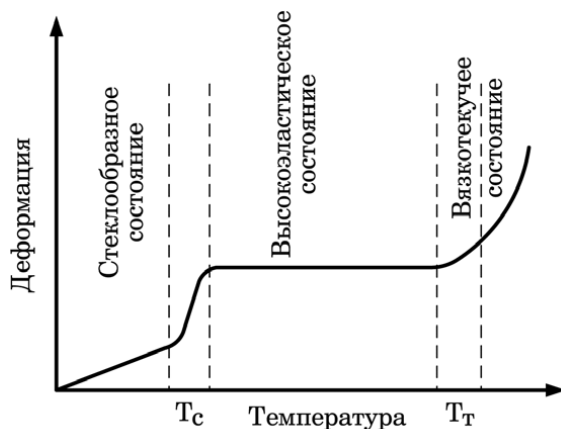


Рис. 22

Термомеханическая кривая аморфного полимера

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 рисунке 23 показаны термомеханические кривые кристаллических полимеров. До температуры плавления деформации полимера малы. После достижения температуры плавления полимер переходит в высокоэластическое состояние (кривая 1 на рис. 23). 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.

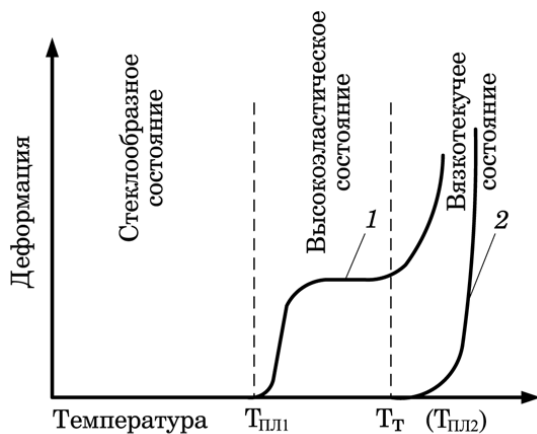


Рис. 23

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. 23). 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 $-\text{CH}_3$ группами равна $160...170^\circ\text{C}$, для полиамидов с полярными $-\text{CONH}$ группами — $220...250^\circ\text{C}$, а полиэтилентерефталата — 255°C .

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 (рис. 24).

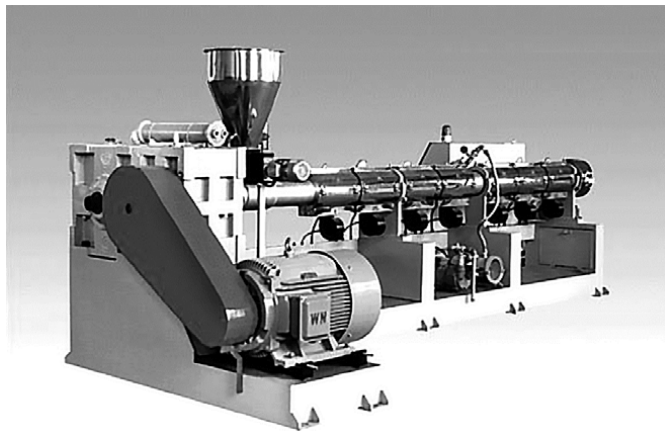


Рис. 24
Экструзионная машина

Принцип работы экструдера состоит в том, что в нагреваемом материальном цилиндре вращается шнек, который уплотняет, расплавляет и гомогенизирует полимерную массу, а затем выдавливает ее сквозь выходное отверстие формующей головки. Сам по себе экструдер еще не является машиной для переработки полимеров, а представляет собой лишь пластицирующее устройство.

Экструдер, укомплектованный формующей головкой, устройствами калибровки, охлаждения, отвода и намотки, — это технологическая установка для переработки полимеров (рис. 25).

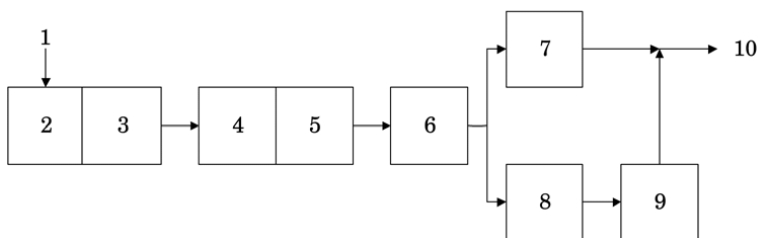


Рис. 25

Схема экструзионной линии:

1 — полимерное сырье; 2 — экструдер; 3 — формующая головка; 4 — калибровка; 5 — охлаждение; 6 — тянущее устройство; 7 — намотка; 8 — сепаратор; 9 — приемное устройство; 10 — экструдат.

Наряду с одношнековыми машинами также используются и многошнековые экструдеры.

Наиболее простым является одношнековый экструдер без зоны дегазации (рис. 26). Основными элементами экструдера являются обогреваемый цилиндр, шнек (с охлаждением или без него), сетки, размещаемые на решетке, и формующая головка.

Технологический процесс экструзии складывается из последовательного перемещения материала вращающимся шнеком в его зонах (см. рис. 26) питания (*I*), пластикации (*II*), дозирования расплава (*III*), а затем продвижения расплава в каналах формующей головки.

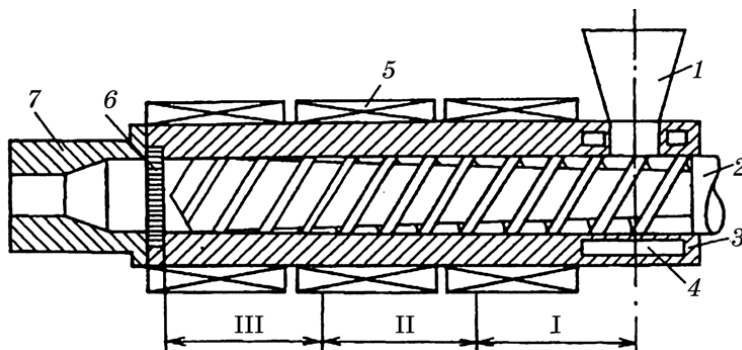


Рис. 26

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.

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, величина 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. 27). 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.

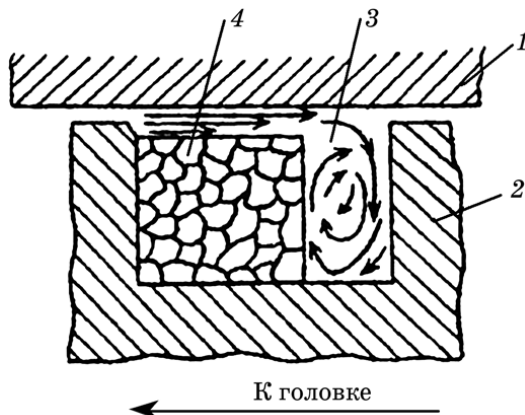


Рис. 27

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.

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. 27), где происходят интенсивные сдвиговые деформации, — материал пластицируется. Последнее обстоятельство приводит к выраженному смесительному эффекту. Расплав интенсивно гомогенизируется, а составляющие композиционного материала перемешиваются.

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 формующую оснастку и, приобретая определенный профиль, выходит практически под очень небольшим избыточным давлением из фильерной части головки.

Именно таким способом готовится филамент, используемый впоследствии для изготовления изделий с помощью аддитивных технологий, в частности FDM-печати (рис. 28).



Рис. 28

Экструзионная линия для производства филамента

Одним из сдерживающих факторов развития FDM-печати является относительно высокая стоимость расходных материалов. Хотя большинство пластиков вполне по карману обычному пользователю, разница между сырьем и готовой нитью весьма значительна — зачастую стоимость прутка превышает стоимость гранул аналогичного веса в десятки раз. Таким образом, нет ничего удивительного, что на свет появились портативные, настольные устройства для домашнего производства нити из гранул и пластиковых отходов.

Такие установки позволяют значительно снизить себестоимость печати и, конечно же, улучшить экологию. В этом разделе мы рассмотрим наиболее известные наработки по домашнему производству прутка, включая экструдеры нити и шредеры пластиковых отходов.

Наиболее известная разработка, отличающаяся высокой производительностью — *Filabot Original* (рис. 29). Устройство предназначено для работы с ABS (сополимер акрилонитрила с бутадиеном и стиролом, АБС-пластик), PLA

(полилактид, ПЛА-пластик) и HIPS (ударопрочный полистирол, УПС) и представляет собой микроэкструдер.

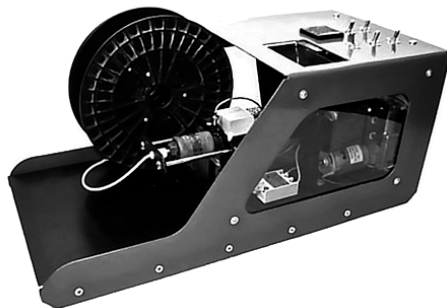


Рис. 29

Filabot Original — наиболее известное устройство для домашнего производства прутка

Диаметр прутка может составлять 1,75 мм или 3 мм в зависимости от насадки. Скорость экструзии составляет 250–750 мм в минуту в зависимости от диаметра изготавливаемого прутка.

Скорость вращения шнека составляет 35 оборотов в минуту. Потребляемая мощность устройства достигает 300 Вт в зависимости от температуры экструзии. Экструдер оснащен фильтром для удаления загрязняющих частиц непосредственно перед экструзией.

В качестве расходного материала используется гранулированный пластик, но возможно и использование пластиковых отходов при том условии, что размер частиц не превышает 5 мм. Кроме того, возможно смешивание ABS, PLA и HIPS с углеволокном для получения более прочных и износостойчивых материалов. Для получения подобного композита требуется лишь смешать пластик с гранулами углеволокна и, если требуется, красителя, а затем загрузить готовую смесь в бункер экструдера.

ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

Аддитивное производство — это процесс соединения, или отверждения, материалов слой за слоем для изготовления деталей непосредственно из трехмерных цифровых моделей. Техника привлекла огромное внимание исследователей как из академических кругов, так и из промышленности. С помощью аддитивного производства можно оптимизировать топологически сложные и трудные в изготовлении конструкции без использования дополнительных инструментов. Это позволяет изготавливать легкие интегрированные конструкции, которые представляют интерес для целого ряда отраслей, включая транспортный сектор, для содействия снижению расхода топлива и, следовательно, выбросов. В медицинской промышленности аддитивное производство сделало настройку медицинских устройств более быстрой и доступной. Для производителей автомобилей аддитивное производство помогает сэкономить на расходах за счет сокращения сроков изготовления заказных деталей малого объема.

В настоящее время существует множество технологий для материализации реальных объектов из созданных виртуальных 3D-моделей. Наиболее распространенная и доступная технология — это печать полимерными материалами.

Принято разделять технологии 3D-печати на четыре основные категории:

- экструдирование — выдавливание расплавленного полимерного материала на подложку;
- фотополимеризация — отверждение фотополимера ультрафиолетовым или лазерным излучением;
- печать методом спекания и плавления полимерных материалов;
- ламинирование — склеивание слоев материала с последующим вырезанием.

Помимо этого существуют другие технологии, промежуточные или не попавшие в вышеуказанные категории по тем или иным причинам.

История и эволюция 3D-печати

История 3D-печати — это всего лишь четыре последних десятилетия технологии. Революционный рост исследований в области науки, техники и технологий привел это нововведение — 3D-печать — к достаточно зрелому уровню. Хронологические разработки технологии 3D-печати могут быть изображены из разных контекстов, таких как время, различные характеристики и технологии. Некоторые исследователи разделили разные этапы истории жизни на несколько основных сегментов. Например, стадия младенчества — с 1981 по 1999 год, стадия юности — с 1999 по 2010 год, стадия взросления — с 2011 года по настоящее время. На протяжении значительного периода своей истории 3D-принтеры были малодоступны, но сейчас их цена значительно снизилась с примерно 20 000 \$ (до 2009 года) до 500–1000 \$ в настоящее время.

История разработки технологий 3D-печати начинается в 1986 году, когда был выдан первый патент на установку стереолитографии (SLA). Этот патент

принадлежал Чаку Халлу (Charles W. Hull), американскому инженеру, который в 1983 году разработал первую SLA-установку. После получения патента Халл создал компанию *3D Systems Corp.*, 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 1988-ом.

Однако концептуальные работы по технологиям 3D-печати датируются 70-ми годами прошлого века, а помимо Халла, несколько других людей в мире работали над стереолитографией. Доктор муниципального промышленного исследовательского института в Нагоя, Хидео Кодاما (Hideo Kodama), в 1980 году подал заявку на регистрацию патента на устройство, которое с помощью УФ-засветки послойно формировало жесткий объект из фотополимерной смолы. В 1983 году трое инженеров — Ален Ле Миуте (Alain Le Méhauté), Оливье де Витт (Olivier de Witte) и Жан-Клод Андрэ (Jean-Claude André) из французского национального центра научных исследований, в попытке создать то, что они называли «фрактальным объектом», пришли к идее использования лазера и мономера, который под воздействием лазера превращался в полимер. Заявку на патент они подали за три недели до американца Чака Хала.

Помимо стереолитографии в тот же период начали развиваться и другие технологии 3D-печати. В 1987 году Карл Декард (Carl R. Deckard) Джо Биман (Joe Beaman), сотрудники Техасского университета, подали заявку на патент, описывающий процесс быстрого прототипирования изделий с помощью технологии селективного лазерного спекания (SLS). 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 сделало эту технологию общедоступной.

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

В 1989 году авиационный инженер Стивен Скотт Крамп (S. Scott Crump), один из основателей компании *Stratasys Inc.*, заявил о разработке технологии послойного наплавления (Fused Deposition Modelling — FDM), которая до сих пор используется компанией *Stratasys Inc.* и применяется на различных машинах начального уровня других производителей. Сама идея создания прототипов при помощи расплавленного пластика появилась у Крампа еще в 1988 году. Крамп искал простой способ создания игрушечной лягушки для своей дочери и использовал горячий клеевой пистолет: расплавил пластик и разлил его по слоям. Уже четыре года спустя *Stratasys* продала свое первое устройство, использующее эту технологию — *3D Modeler*. Вплоть до 2003 года технология FDM была самой популярной на рынке. С истечением срока действия патента на эту технологию в 2009 году люди могли использовать этот тип печати, не платя

Stratasys Inc. за право делать это, что привело к падению цен на два порядка с момента создания этой технологии.

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 *STEREOS 400* была поставлена в 1990 году в отдел разработок концерна BMW, а в 1994-ом была выпущена первая установка лазерного спекания пластиковых порошков (SLS) *EOSINT P350*, 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. В первых, как существующие, так и новые компании-производители оборудования 3D-печати 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, смещающая производственную парадигму с традиционных технологий на аддитивные и определяющая контуры приближающейся Третьей промышленной революции.

Состояние до 1980 года

Предполагается, что фундамент концепции 3D-печати был заложен в 1860 году парижским фотографом Фрэнсисом Вилленом. Он сделал изобретение, известное как «механическая скульптура», для создания трехмерной портретной скульптуры с использованием камеры, фотографии и пантографа с большей точностью и меньшим возможным временем (48 часов), чем в традиционных методах создания скульптур, которые в то время требовали нескольких месяцев. В 1892 году Бланхером была предложена идея создания топографической карты методом наслоения, которая фактически была концептуальной основой современного аддитивного производства. Дальнейшего развития этих идей не было найдено до 1940 года, когда Перейра также использовал аналогичный метод для создания 3D-карты, вырезая и наклеивая контурные линии на лист картона. Затем эта идея была усовершенствована Зангом (1964) и Гаскиным (1973), они описали включение прозрачных пластин с топологическими объяснениями и трехмерное устройство для изучения геологии и для составле-

ния различных карт поверхности Земли. В 1972 году Матсубара из Mitsubishi Motors предложил топологический метод создания фотоотверждаемого слоистого материала с использованием фотополимерной смолы, нанесенной на огнеупорные частицы. Позже ДиМаттео (1974) обнаружил, что этот метод может быть применен для других изделий, которые трудно изготавливать с помощью традиционных технологий, таких как воздушные винты, аэродинамические профильные изделия, 3D-камеры и матрицы. Первая заявка на патентование этой идеи была подана Вином Келли Свейнсоном в 1977 году. Он использовал чувствительный к лазерному излучению мономер, который вызывал реакцию сшивки на поверхности создаваемого изделия. Наконец, идея 3D-печати была замечена и использована для быстрого прототипирования. Концепция сшивки фотополимера лазерным излучением была теоретически разработана Хидео Кодамой и Аланом Гербертом. Они также подали патент, но его не зарегистрировали из-за невозможности представить полную патентную спецификацию к следующему году подачи заявки.

Физическое начало 3D-печати: 1981–1990 годы

В этом десятилетии состоялось официальное открытие двух популярных и широко используемых 3D-технологий печати. Селективное лазерное спекание (*Selective Laser Sintering* — SLS) и моделирование методом осаждения расплавленной нити (*Fused Deposition Modelling* — FDM). Первый патент под названием «Аппарат для стереолитографического производства трехмерных объектов» был выдан Чаку Халлу в 1986 году. Тогда же появились и первые коммерческие 3D-принтеры. Он также разработал формат файла Стандартного языка тесселяции (*Standard Tessellation Language* — STL), который переводит 3D-цифровой файл в 3D-печатный объект. В том же году Карл Р. Декард запатентовал первый SLS 3D-принтер по прозвищу «Бетси», который был способен плавить частицы пластиковых, металлических, керамических или стеклянных порошков и создавать твердотельные 3D-объекты с помощью излучения высокоэнергетического лазера. Наиболее распространенный настольный FDM 3D-принтер был изобретен в 1989 году Скоттом Крапом, который основал фирму *Stratasys Inc.* Использование программного обеспечения автоматизированного проектирования (САПР) для проектирования объектов 3D-печати было разработано компанией *EOS* в Германии.

Стадия развития I: 1991–2000 годы

В этом десятилетии произошло много разработок существующих и новых 3D-принтеров, а также новых материалов для этих принтеров. Первые 3D-принтеры имели серьезные технические ограничения и недостатки, которые ограничивали их применение для массового производства 3D-объектов. Поэтому проводились исследования с целью улучшения технических характеристик 3D-принтеров, которые в основном включали производство ламинированных объектов, отверждение порошков, непосредственное литье в форму и крупномасштабную SLS-печать. В течение этого десятилетия были также разработаны некоторые новые принтеры, такие как 3D-принтер для воска, *ZPrinter* от ком-

пании *Z Corp.* и 3D-принтер для металла. В этом десятилетии произошло несколько знаменательных событий, связанных с несколькими удивительными открытиями, в том числе такими замечательными инновациями, как изготовление 3D-печатного человеческого органа — мочевого пузыря, созданного из собственных клеток пациента, гибкость дизайна, позволяющая применять для 3D-печати твердые и мягкие материалы с различными эстетическими характеристиками и функциями.

Стадия развития II: 2001–2010 годы

Функциональная гибкость, массовая настройка, точность, высокое разрешение, персональные бытовые 3D-принтеры, удобство использования, легкость доступа и исследовательский бум для создания новых материалов со сложными характеристиками — вот те заметные достижения, произошедшие в течение этого десятилетия. Компания *Envisiontec* представила в 2001 году 3D-принтер *Perfactory Machine*, который был способен производить исключительно крупные детали на высоких скоростях с должной точностью. В последующие годы были представлены коммерческая электронно-лучевая система плавления, которая расплавляет металлический порошок, и многоцветный 3D-принтер от *Z Corp.* Одной из прорывных идей десятилетия стал проект *RepRap*, в результате которого 3D-принтер появился дома благодаря легко доступной системе с открытым исходным кодом и самовоспроизводящимися деталями (то есть изготавливаемыми на самом 3D-принтере). Примечательно, что материальными разработками этого десятилетия стали: первая 3D-печатная почка от китайских исследователей, кровеносный сосуд человека, 3D-протезирование без сборки деталей, создание потребительских товаров, первая готовая одежда (изготовленные на 3D-принтере бикини, пляжная обувь), куклы для 3D-анимации и изготовленная на 3D-принтере мебель. Другим значительным событием этого десятилетия стало истечение срока действия патента на FDM-технологии 3D-печати, что значительно расширило доступность этого метода. Впоследствии тысячи заинтересованных сторон по всему миру начали легко использовать и испытывать эту технологию. Кроме того, появление большого количества новых материалов в те времена и широкое внедрение этой технологии заинтересованными сторонами последовали за разработкой первого стандарта ASTM для продуктов с аддитивным производством в качестве эталона качества и терминологии.

Зрелая стадия: с 2011 года по сегодняшний день

История этой эпохи в основном касалась доступности 3D-принтеров с точки зрения экономической эффективности и использования этой технологии для новейших материалов в многоплановых целях, от товаров личного пользования до промышленных товаров, таких как продукты питания, игрушки, украшения, автомобили, здания, самолеты, одежда и модные аксессуары, биомедицина и робототехника. Стоимость FDM 3D-принтеров в 2012–2013 годах резко снизилась с десятков тысяч до тысяч и даже до сотен долларов, что повысило доступность этой технологии. Увеличение исследовательских работ, свя-

занных с этой удивительной технологией, привело к появлению *Urbee* (первого 3D-печатного автомобиля), 3D-принтера для пищевых продуктов, разработанного Корнельским университетом, для производства инструментов по запросу NASA, 3D-печатного инжектора ракетного топлива, лунного жилья Европейского космического агентства (ESA) и продления срока жизни 3D-печатной шины. В 2011 году журнал *Time* представил 50 лучших изобретений года, среди которых было гибкое платье, изготовленное с помощью 3D-печати, разработанное Айрис ван Херпен. В популярной статье *The Guardian* упомянул Чака Халла как отца 3D-печати и сообщил: «Халл знал, что его изобретению понадобится до 30 лет, чтобы найти дорогу в дома людей. Сегодня возможности этого изобретения кажутся бесконечными».

Открытие 3D-печати с непрерывным армированием волокнистыми наполнителями в 2016 году Матсузаки и др. является прекрасным дополнением для улучшения механических свойств печатных деталей со сложной топологией, которые могут привести к будущему 3D-производству изделий.

Первые создаваемые *3D Systems* и *Stratasys Inc.* агрегаты были громоздкими и дорогостоящими. Стоимость одного аппарата составляла сотни тысяч долларов, и использовать их могли только крупнейшие компании автомобильной и аэрокосмической отрасли. Принтеры имели массу ограничений и не могли широко применяться. Развитие технологии шло очень медленно. Спустя 20 лет, в 2005 году появился проект *RepRap (Replicating Rapid Prototyper)* — самовоспроизводящийся механизм для быстрого изготовления прототипов.

Его идейным вдохновителем был доктор Эдриан Бауэр из Университета Бата в Великобритании. Целью проекта было «самокопирование», воспроизведение компонентов самих 3D-принтеров. На фотографии (рис. 30) все пластиковые детали «ребенка» напечатаны на «родителе».

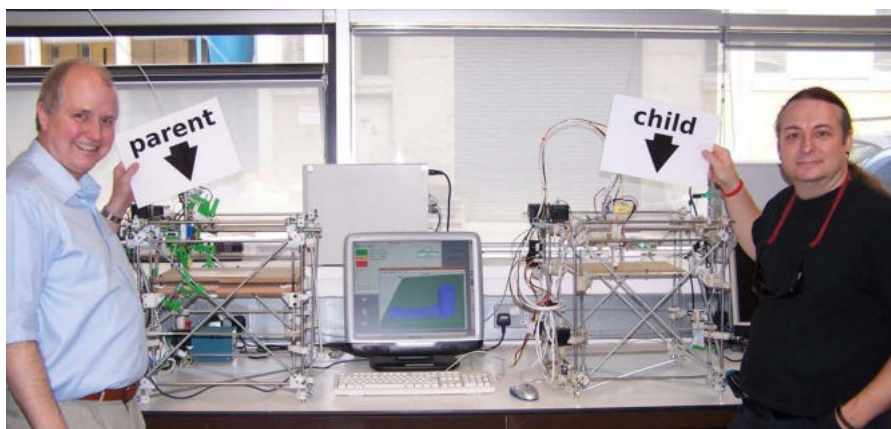


Рис. 30

Эдриан Бауэр и Вик Оливер возле RepRap 3D-принтера, детали которого напечатаны с помощью принтера-родителя

Но фактически группа энтузиастов во главе с Эдрианом смогла наконец создать бюджетный 3D-принтер для домашнего или офисного использования.

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 Крапом, который позже запатентовал ее и основал компанию *Stratasys Inc.*

В настоящее время принцип экструзии материала, также называемый моделированием путем осаждения расплавленного материала, считается наиболее широко используемой технологией среди всех типов технологии 3D-печати во всем мире из-за ее экономичности и простоты. Развитие FDM началось с печати термопластичным полимером — технологии 3D-печати, которая известна как изготовление наплавлением нити (*Fused Filament Fabrication* — FFF). Печатные изделия FFF демонстрируют достаточно плохие механические свойства, поэтому их часто используют в качестве прототипов или игрушек.

В целях повышения производительности пластикового композита различные наполнители — сажа, рубленые волокна, тальк — смешиваются с термопластичной матрицей и затем прессуются вместе во время печати. Производительность при печати этими композитами существенно зависит от ориентации волокон в пластике и объемной доли волокон (*Fiber Volume Fraction* — FVF). Однако изделия, полученные из таких полимерных композиционных материалов (ПКМ), по-прежнему демонстрируют худшие механические характеристики по сравнению с традиционными армированными волокнами ПКМ. Поэтому, чтобы расширить применение технологии 3D-печати, FMD было предложено производить печать непрерывно армированным термопластом. Технология, доступная на рынке с этой функцией, известна как непрерывное изготовление нитей (*Continuous Filament Fabrication* — CFF).

Технология FDM-печати

Согласно классификации американской ассоциации по разработке стандартов (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. Источником материала обычно служит катушка с намотанной пластиковой нитью — филаментом. Через головку и специальное сопло (рис. 31) 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.

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 (рис. 32).



Рис. 31

Экструзионные головки различных FDM-принтеров

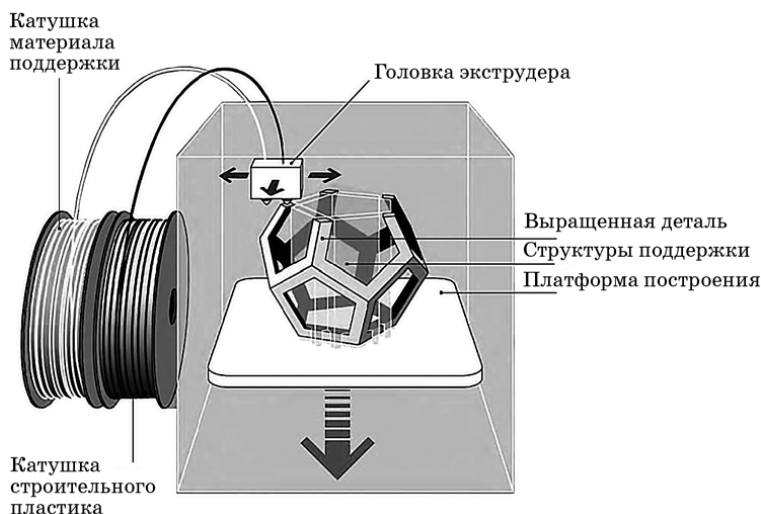


Рис. 32

Технология FDM 3D-печати

FDM 3D-печать — наиболее распространенная и доступная технология печати полимерными материалами — послойное нанесение расплава полимера на подложку.

Основным конструктивным элементом FDM-3D-принтера является печатающая головка (рис. 33), 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.

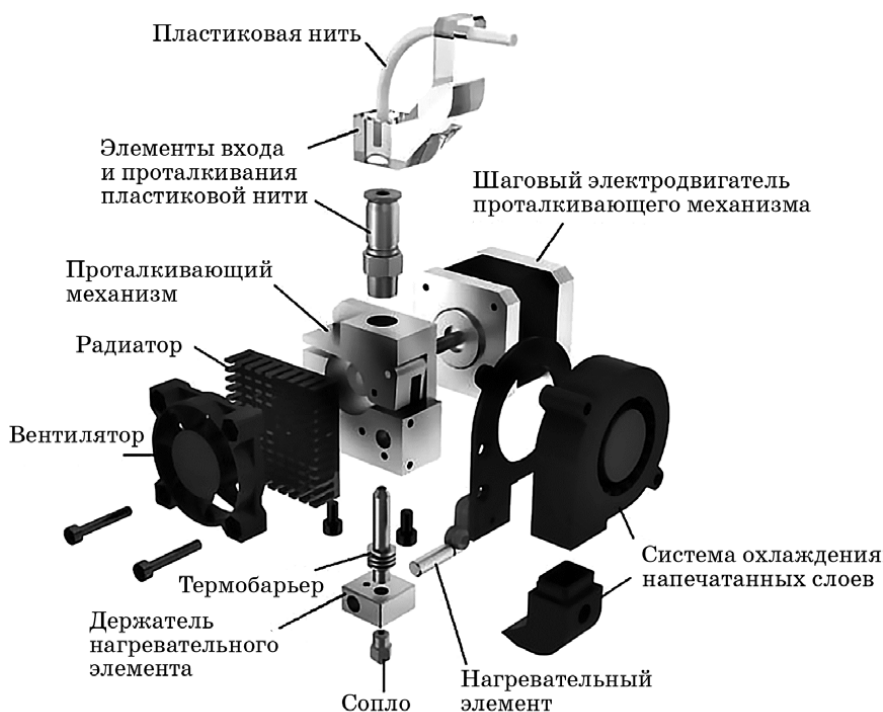


Рис. 33

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. На рисунке 34 показан принцип FDM-печати.

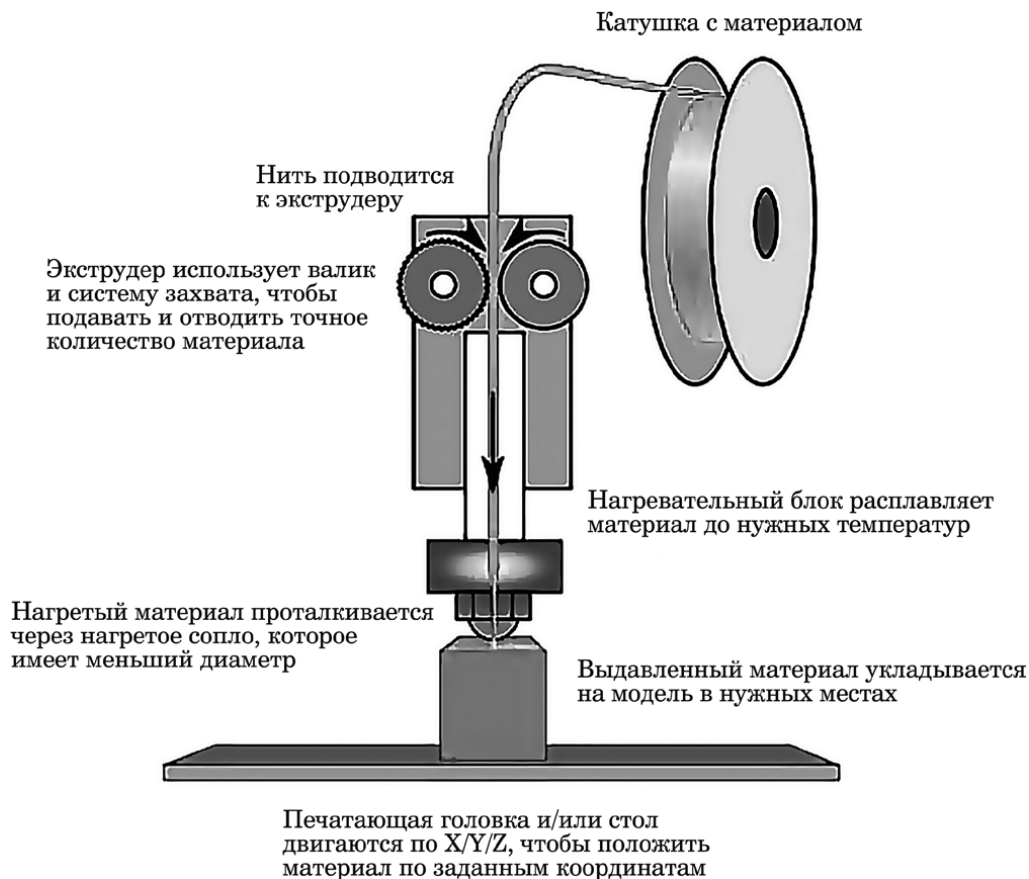


Рис. 34

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, SLDPRT и некоторых других. 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 на эту толщину и весь процесс повторяется.

На рисунке 35 изображена 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.



Рис. 35

Модель, напечатанная 3D-принтером с технологией FDM-печати

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 (см. рис. 34).

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. 36) — 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.

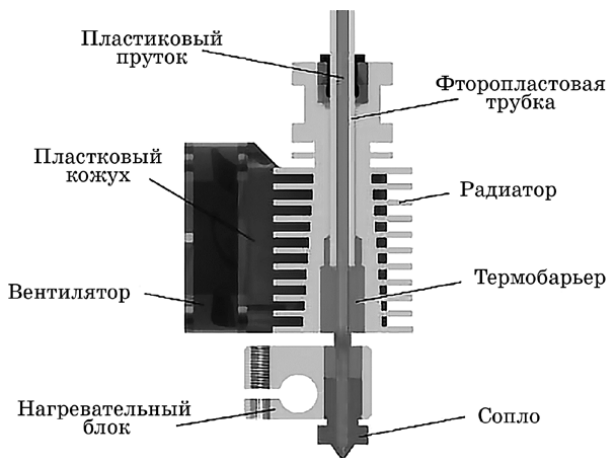


Рис. 36

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 как 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.

Количество экструдеров может варьироваться в зависимости от предназначения 3D-принтера. Простейшие варианты используют одну печатающую головку (рис. 37).

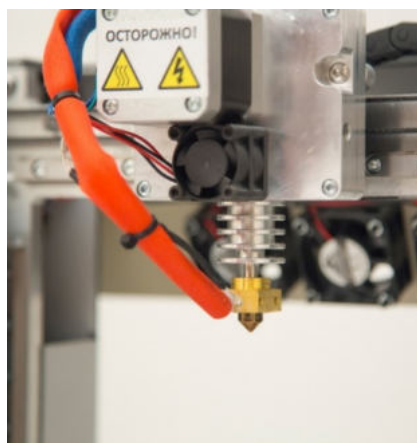


Рис. 37

Экструдер FDM-принтера PrintBox3D One производства российской компании RGT

Двойной экструдер значительно расширяет возможности устройства, позволяя печатать одну модель двумя разными цветами, а также использовать раз-

ные 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. 38).

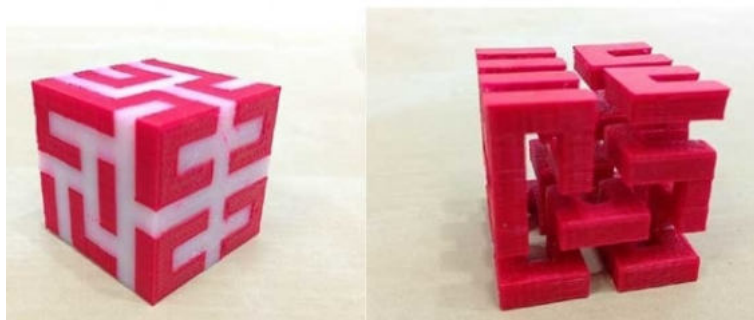


Рис. 38

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 выравнивать градиент температур между верхними и нижними слоями (рис. 39).

Для некоторых материалов подогрев противопоказан. Характерный пример — PLA-пластик, который требует достаточно длительного времени для застывания. 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.



Рис. 39

Подогреваемая платформа, накрытая съемным стеклянным рабочим столиком

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. 40).



Рис. 40

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. 41).

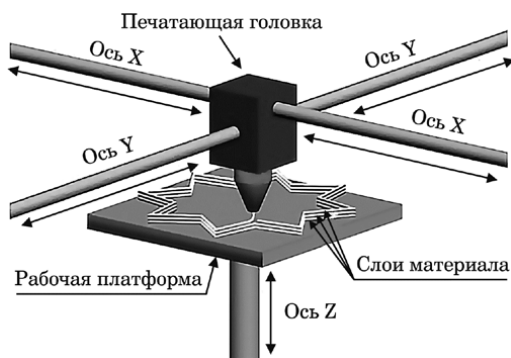


Рис. 41

Схема работы позиционирующих механизмов

Схема позиционирования может варьироваться. Самый простой и распространенный вариант подразумевает крепление печатающей головки на перпендикулярных направляющих, приводимых в движение шаговыми 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. 42).

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.



Рис. 42

Дельта-принтер ORION производства компании SeeMeCNC

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 шаговых моторов, обеспечивающих позиционирование экструдера, выполняется достаточно простыми электронными контроллерами. Большинство контроллеров основываются на платформе Arduino, имеющей открытую архитектуру (рис. 43).

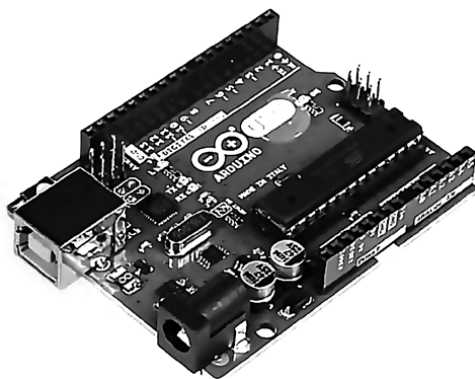


Рис. 43

Типичный контроллер на основе Arduino

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. 44).

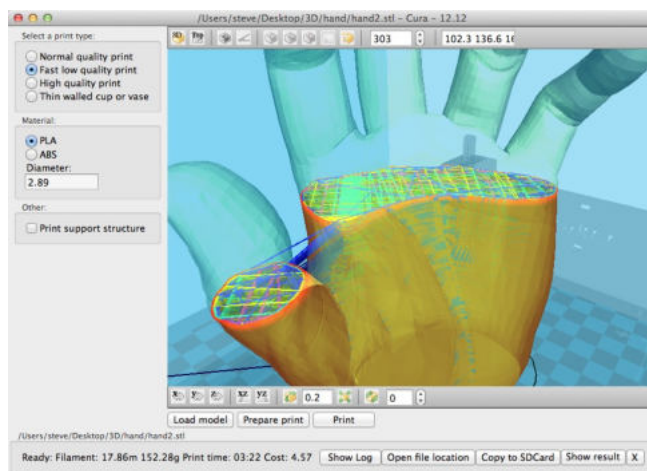


Рис. 44

Программный код для печати генерируется с помощью ПО-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 САД-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. 45).



Рис. 45

FDM-принтер *MakerBot Replicator* 5-го поколения (School Specialty, Canada) 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 трёхмерном пространстве (рис. 46).

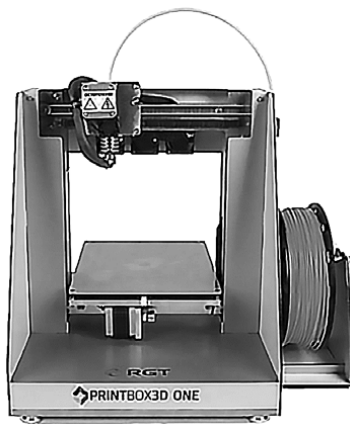


Рис. 46

Бытовой FDM-принтер *PrintBox3D One* российской компании *RGT* для печати полимерными филаментами

FDM-принтеры весьма и весьма разнообразны, начиная от простейших самодельных RepRap принтеров и заканчивая промышленными установками, способными печатать крупногабаритные объекты.

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 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. 47).



Рис. 47

CubePro Trio — профессиональный 3D-принтер от американской компании 3D Systems

Лидером по производству промышленных установок является компания *Stratasys*, основанная автором технологии FDM-печати Скоттом Крампом (рис. 48).



Рис. 48

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*.

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.

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. 49). Несмотря на свою «самодельную сущность», RepRap-принтеры вполне способны производить модели с качеством на уровне дорогих фирменных собратьев.



Рис. 49

Вариант популярного RepRap-принтера *Prusa* позднего, третьего поколения

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, что сегодня вовсе не обязательно искать обладателя принтера, чтобы напечатать возможные детали для создания 3D-принтера проекта RepRap, и бегать по магазинам в поисках остального оборудования. Предлагаются полные наборы для самостоятельной сборки 3D-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. 50).

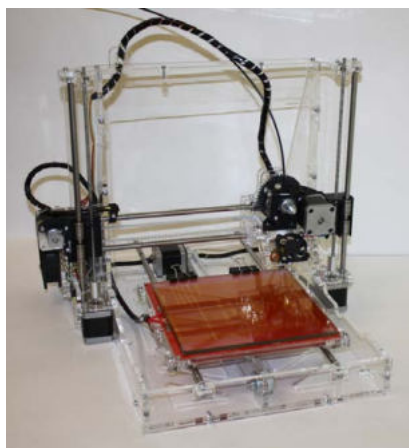


Рис. 50

Типичный *DIY-kits* FDM-принтер проекта RepRap

Современные наборы *DIY-Kits* позволяют собрать в домашних условиях 3D-принтеры, обладающие весьма неплохими характеристиками и привлекательным внешним видом (рис. 51).



Рис. 51

DIY-Kit 3D-принтер *FlyingBear Ghost 5* (Брэнд — **3DSYSTEMPRO** EST. 2012 )

3D-принтер *FlyingBear Ghost 5* снабжен системой подачи филамента с двойным приводом типа BMG (*Bondtech Mini Geared*) — Dual Drive Extruder (рис. 52), сочетающей в себе высокую производительность и разрешение с небольшим весом.



Рис. 52

Dual Drive экструдер 3D-принтера *FlyingBear Ghost 5* с двумя двигателями

Независимо от того, требуются ли вам печать с высоким разрешением при помощи сопла с небольшим диаметром или печать с высокой скоростью с помощью сопла с большим диаметром, оптимизированное передаточное число в сочетании с прецизионными приводными механизмами Dual Drive экструдера обеспечивают бесперебойную и равномерную подачу филамента в головку и отсутствие проскакивания нити.

Обыденные же пользователи, не желающие вникать в тонкости процесса создания 3D-принтера, 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. 53).



Рис. 53

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.

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, модель	Тип принтера	Материалы	Кол-во сопел/диаметр, мм	Толщина слоя, мм	Подогрев стола	Герметичная камера	Макс. размеры детали, мм	Цена, руб
3D-эксперты, Prusa Mendel	RepRap	ABS, PLA	1/0,5	0,3–0,5	Есть	Нет	200×200×120	29 900
3D-эксперты, Engineer V2	<i>DIY-Kits</i>	ABS, PLA, HIPS, PA, PC, FilaFlex, Lavwoo	1/0,35	0,1–0,35	Есть	Нет	200×200×180	43 900
Центр аддитивных технологий, Альфа	<i>DIY-Kits</i>	ABS, PLA	1/0,1–0,4	0,1–0,3	Есть	Нет	215×215×165	35 000

Производитель, модель	Тип принтера	Материалы	Кол-во сопел/диаметр, мм	Толщина слоя, мм	Подогрев стола	Герметичная камера	Макс. размеры детали, мм	Цена, руб
3DSYSTEMPRO, FlyingBear Ghost 5	<i>DIY-Kits</i>	PLA, ABS, HIPS, PETG, NYLON (PA), FLEX, ASA, SBS, TPU, Tough PLA, POM, Rubber, BRONZEFILL, COPPERFILL, WOODFILL	1/0,1–0,4	До 0,05	Есть	Нет	255×210×200	32 900
Picasso 3D, Designer Pro 250	Full	PA, ABS, ABS/PS, PET, Elastic, ABS + HIPS, PLA + PVA	2/0,15–0,3	0,05	Есть	Да	200×200×210	140 000
3D Quality, Prism Pro	Full	ABS, PLA	1/0,3	0,03–0,3	Есть	Да	400×400×850	175 000
Центр аддитивных технологий, Альфа	Full	ABS, PLA	1/0,3	0,1–0,3	Есть	Да	200×200×200	55 000

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.

CFF — метод непрерывного армирования волокнами

CFF (*Continuous Filament Fabrication*) — технология 3D-печати, основанная на патентованной методике соэкструзии непрерывного армирующего волокна с термопластичным полимером. Различные термопласты могут быть армированы непрерывным углеволокном для производства легких и прочных де-

талей. За счет управляемой укладки армирующего волокна удается достичь высоких механических свойств конечной детали (рис. 54).

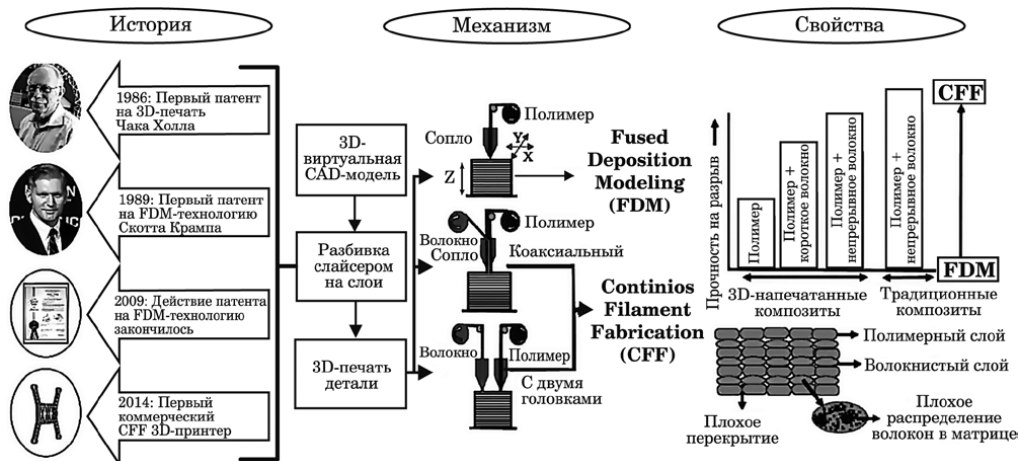


Рис. 54

Технология 3D-печати соэкструзией непрерывного армирующего волокна с термопластичным полимером (CFF)

Технология 3D-печати непрерывным армирующим волокном заключается в следующем. 3D-принтер оснащается микроэкструдером, в который подается композитное волокно и филамент из термопласта. Композитное волокно предварительно изготавливается на установке, являющейся по существу миниатюрной пропиточной машиной, в которую подается сухой углеродный ровинг, который пропитывается термореактивным связующим, отверждается и наматывается на бобину. Изготовленное композитное волокно подается в экструдер 3D-принтера, где оно покрывается расплавленным термопластом и укладывается по программе, определяющей структуру материала и форму изготавливаемого элемента конструкции. Экспериментальный 3D-принтер, способный печатать композитами, армированными непрерывными волокнами показан на рисунке 55.



Рис. 55

Настольный 3D-принтер для изготовления деталей из композитов, армированных непрерывными волокнами *Anisoprint Composer* российской компании *Anisoprint*

Основные рабочие процедуры создания объекта с использованием этой технологии 3D-печати одинаковы для всех доступных технологий и состоят из трех основных этапов, а именно: создание 3D-модели, нарезка модели на слои и 3D-печать. Во-первых, требуется разработка виртуального трехмерного объекта с использованием программного обеспечения САПР, которое способно генерировать формат файла, который легко читается программным обеспечением слайсера. Программное обеспечение слайсера предназначено для работы с каждым 2D-слоем 3D-модели объекта, обработки и передачи этой информации на принтер для 3D-печати в изделие. Технология печати отличается друг от друга в основном за счет механизма печати и физических форм исходных материалов.

Экспоненциальное развитие исследований за последнее десятилетие привело к появлению многочисленных научных статей и патентов, посвященных 3D-технологиям.

Генеральному директору Continuous Composites (Кер-д'Алэн, штат Айдахо, США) приписывают идею печати непрерывными композитами, которую он назвал *Continuous Scaled Manufacturing* (CSM) в 2012 году на основе метода SLA. Тем не менее первая зарегистрированная исследовательская статья о FDM 3D-печати непрерывным волокнистым композитом была представлена Матсузаки и др. Эта публикация позже положила начало приблизительно сотне новых научных статей о FDM 3D-печати непрерывным волокнистым композитом. Наряду с этими исследовательскими статьями недавно был опубликован ряд обзорных статей о различных аспектах аддитивных технологий.

Рисунок 56 показывает схематическое представление способа непрерывного изготовления деталей из полимеров, армированных непрерывным волокном, с использованием традиционных 3D-принтеров с модифицированной печатающей головкой.

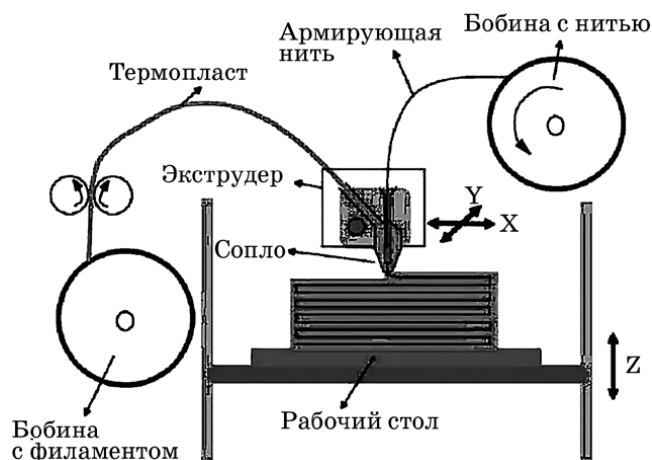


Рис. 56

Схематическое изображение процесса FMD 3D-печати с использованием непрерывной армирующей нити с модифицированной печатающей головкой с одним соплом

В отличие от армированных рубленными волокнами композитов, он имеет два отдельных источника материала для матрицы (термопласта) и армирующей

щей нити. Экструзионное сопло принимает термопластичный полимер, а непрерывное волокно проходит через сердечник. В результате, когда сопло нагревают, происходит инфузия матрицы, и расплавленный термопластичный материал осаждается вместе с армирующей нитью.

Температура сопла выбирается исходя из тепловых свойств термопластичного полимера. Как только материал откладывается и попадает на печатный слой, он быстро затвердевает и прилипает к предыдущему слою. Печатающая головка предназначена для перемещения в двухмерных движениях, то есть X–Y направления и ответственность за проектирование каждого слоя в соответствии с траекторией 3D CAD-модели, переданной с помощью программного обеспечения для нарезки. Третье движение вдоль направления Z на расстояние, равное толщине слоя, осуществляется строительной платформой после каждого слоя, что продолжается до завершения печати.

Еще один шаг был замечен с разработкой первого в истории коммерческого композитного принтера на основе FDM Markforged в 2014 году, который предлагает печатающую головку с двумя отдельными соплами для подачи пластика и армирующего волокна.

Здесь, в отличие от системы с одним соплом, можно усилить отдельный слой. Две форсунки не работают одновременно, а одна останавливается, в то время как другая работает, непрерывное волокно интегрируется с пластиком таким образом, чтобы оно могло прилипнуть к предыдущему слою во время экструзии. На рисунке 57 показана схема механизма печати 3D-принтера Markforged с печатающей головкой с двумя соплами.

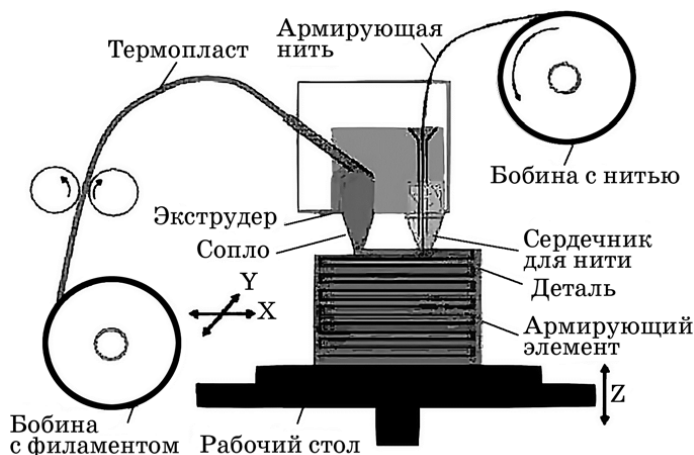


Рис. 57

Схематическое изображение процесса FMD 3D-печати с использованием непрерывной армирующей нити с печатающей головкой с двумя соплами

Orbital Composites, новая начинающая компания, утверждает, что она преодолела ограничения, с которыми сталкивается Markfogred Inc. в отношении скорости, расслоения, минимизации пустот, производительности и возможности печати, хотя она основана на принципе единого сопла, называемом коакси-

альным экструдером, где непрерывная армирующая нить проходит через ядро полимерной матрицы, как в традиционных модифицированных принтерах (рис. 58).

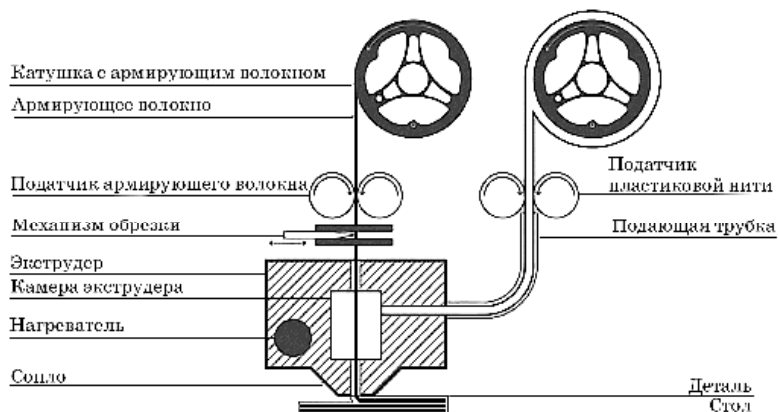


Рис. 58

Схематическое изображение процесса FMD 3D-печати с использованием непрерывной армирующей нити и коаксиальным экструдером *Orbital Composites*

Кроме того, *Orbital Composites* представила роботизированную печатающую головку (рис. 59) с несколькими экструдерами для увеличения производительности и выполнения легких задач из прочной композитной детали.

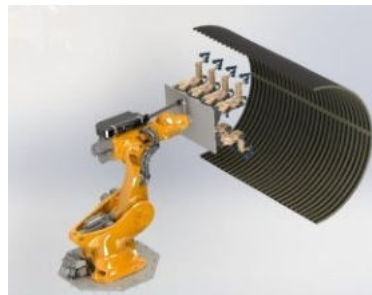
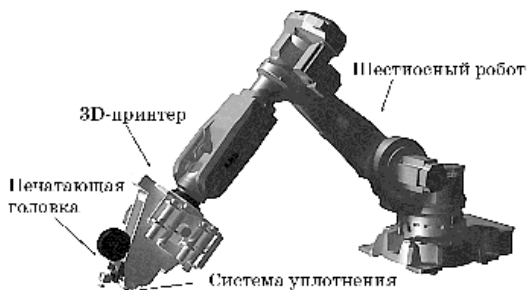


Рис. 59

Роботизированная печатающая головка с коаксиальным экструдером *Orbital Composites*

Печатающая головка также интегрирована с формовочным валиком для создания давления на печатные слои, чтобы минимизировать пустое пространство, и капиллярный инжектор, чтобы выборочно вводить эпоксидную смолу для заполнения просветов. Однако это не поясняет, как контролировать давление формовочного валика и контроль объемной доли волокон, если матрица и непрерывная нить осаждаются вместе. Кроме того, может существовать компромисс между разрешением печати и толщиной слоя, поскольку заявленная толщина слоя составляет 0,4 мм, что больше, чем 0,1 мм для *Markforged Inc.*, которая способна печатать более точно. Несмотря на то что формовочный валик способствует уменьшению пустого пространства, он может деформировать

печатную деталь за счет эффекта сглаживания. Большинство предлагаемых технологий орбитальных композитов находятся в стадии разработки, и если все упомянутые проблемы будут решены, то это будут отличные решения.

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 бывает 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. 60) 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. 60

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 ма-

териала 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. Это непрозрачный пластик, который легко окрашивается в разные цвета.

Достоинства АБС-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 также следует отнести невысокую стоимость, растворимость в ацетоне (что позволяет не только склеивать детали из АБС-пластика, но также сглаживать с помощью ацетона неровную поверхность). АБС-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 АБС-пластиком выше, чем у PLA, и находится в диапазоне $210\text{--}270^{\circ}\text{C}$. При работе с АБС-нитью ощущается слабый запах. Кроме того, для лучшего прилипания первого слоя модели к рабочему столу требуется подогрев стола примерно до 110°C .

Что касается цены на АБС-пластик, то встречаются упоминания о \$30–40 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. АБС-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°C. Подогрев рабочего стола не является обязательным, но желательно все же нагревать стол до 50–60°C.

К недостаткам относится меньшая, 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 таблице 2.

Другие материалы для FDM-печати распространены гораздо меньше.

ASA (сополимер акрилонитрил, стирола и акрилата) — атмосферостойкий пластик. Аналог АБС-пластика, но более стойкий к ультрафиолетовому излучению. Не желтеет на открытом воздухе.

HIPS (High-impact Polystyrene, ударопрочный полистирол, УПС) — 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°C, цена на 30–50% выше, чем у ABS.

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°C	~50°C
Температура плавления	~220°C	~180°C
Показатель текучести расплава (220°C/10 кг)	5–9 г/10 мин	—

РА (Polyamide, нейлон, полиамид, ПА) — легкий, гибкий, устойчивый к химическому воздействию термопластичный полимер. Детали из него обладают очень низким поверхностным трением.

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

РС (Polycarbonate, поликарбонат, ПК) — довольно твердый полимер, сохраняющий свои свойства в диапазоне температур от –40 до 120°C. 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°C. В виде нити для FDM-печати пока выпускается мало, поэтому цена втрое выше, чем у ABS.

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

РЕТГ — это износостойкий полиэтилентерефталат, модифицированный гликолем для большей долговечности.

ПОМ (полиацеталь, полиформальдегид, полиоксиметилен — ПОМ) — продукт полимеризации формальдегида. Разработан для 3D-печати высокопрочных деталей с низким коэффициентом трения. Термопластичный материал, сочетающий высокий модуль упругости при растяжении и изгибе с хорошей ударной вязкостью и антифрикционными свойствами.

PVA (ПВА) — под этой аббревиатурой 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°C, 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 полимера. Для него тре-

буется немного более низкая рабочая температура печати: 160–170°C. 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°C, температура стола может быть комнатной или слегка повышенной, до 35–40°C.

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°C, подогрев стола не требуется. Причем цвет после застывания будет зависеть от выбранной температуры: чем она выше, тем цвет 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. Аналогичными свойствами обладает и материал **WOODFILL** голландского производителя филаментов для 3D-печати ColorFabb.

Другой экзотический материал, **Laybrick**, содержит минеральные наполнители и позволяет имитировать изделия из песчаника. Рабочая температура находится в пределах 165–210°C. При печати этим материалом с повышением температуры можно получить более грубую поверхность для усиления эффекта имитации песчаника. 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.

FLEX (Flexible PolyEster) — это пластик, используемый для 3D-печати изделий сложной конфигурации, в которых содержатся гибкие элементы. Материал резиноподобный, благодаря чему можно легко напечатать гибкую деталь или отдельную составляющую для готового изделия. Появление гибких элементов в трехмерной печати — новый шаг в ее развитии, открывающий еще больше возможностей.

SBS (триблоксополимер стирола с бутадиеном, СБС-пластик) — термопластичный материал для 3D-печати. Температура экструзии — до 240°C. Теплостойкость — до 70°C. Материал прозрачный — обладает около 93% светопропускания. Имеет небольшую усадку, что позволяет производить печать крупногабаритных изделий сложной конструкции.

TPU (термопластичный полиуретан, ТПУ) — это гибкий, стойкий к истиранию термопластик. Характеризуется высокой гибкостью и долговечностью при обработке, сочетая в себе свойства как термопластов, так и каучуков. Такие свойства материала обусловлены наличием чередующихся последовательно жестких (полиуретановых) и мягких (полиэфирных) сегментов полимерной цепи.

BRONZEFILL является компаундом на основе PLA/PHA (полилактид + полигидроксиалканоат), смешанным с мелким бронзовым порошком. **BRONZEFILL** в четыре раза тяжелее обычного PLA, а его плотность составляет около

4 г/см³. На ощупь материал напоминает настоящий металл. Модели из BRONZEFILL можно отполировать до красивого металлического блеска, как и любые другие бронзовые изделия.

COPPERFILL — это тоже смесь PLA с микрочастицами — в данном случае меди. Это значит, что конечный продукт так же поддается полировке и доводке, как BRONZEFILL.

Композитное армирующее волокно **Anisoprint CCF** представляет собой жгут из тысяч тончайших углеродных моноволокон, пропитанных специальным полимерным составом, обеспечивающим качественную пропитку и адгезию между полимерами и волокном, используемым в 3D-печати. Композитное волокно применяется для армирования пластика в процессе 3D-печати различных изделий.

Одной катушки композитного армирующего волокна длиной в 1 км хватит, чтобы изготовить полностью композитный куб размером 62×62×62 мм или полностью композитную пластину с толщиной 3,85 мм. Объемная доля углеродного волокна в конечном изделии может достигать 25%.

Свойства армирующего волокна *Anisoprint CCF 1.5k*:

- эффективный диаметр — 0,35 мм;
- модуль упругости при растяжении — 140 ГПа;
- прочность на разрыв — 1950 МПа.

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. 61) — профессиональный 3D-принтер от компании *3D Systems*. Нашел свое основное применение в стоматологии и ювелирной промышленности.



Рис. 61

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.

Еще один представитель этого семейства 3D-принтеров — *ProJet 6000 MP* (рис. 62) — 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. Более современной разработкой является 3D-принтер *3D Systems ProJet 7000 MP*.



Рис. 62

3D-принтер *ProJet 6000 MP* американской компании *3D Systems*

Среди настольных профессиональных решений можно отметить 3D-принтер *Nobel 1.0A* (рис. 63) от тайваньской компании *XYZprinting*.



Рис. 63

SLA 3D-принтер *XYZprinting Nobel 1.0A*

XYZprinting входит в группу компаний *Kinpo Group*, которая была основана в 1973 году и является лидером электронной промышленности Тайваня.

XYZprinting выпускает не только профессиональную линейку, но и модели для частного использования.

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:

- 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 двухмерной плоскости легко рисовать разнообразные трудоемкие предметы. Например, быстрота передвижения лазерного луча в 3D-принтере *ATSMake* (рис. 64) 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 днищем;
- зеркало, которое закреплено под углом 45 градусов и отбивает луч лазера на дно емкости;
- механизм, поднимающий/опускающий платформу. В случае с 3D-принтером *ATSMake* (рис. 64) — это высокоточная рельсовая направляющая, выдвижная 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* (см. рис. 64) применяется 3 мм 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, находя-

щийся в емкости, перемешивается, а новый слой намного легче отрывается от дна ванночки.

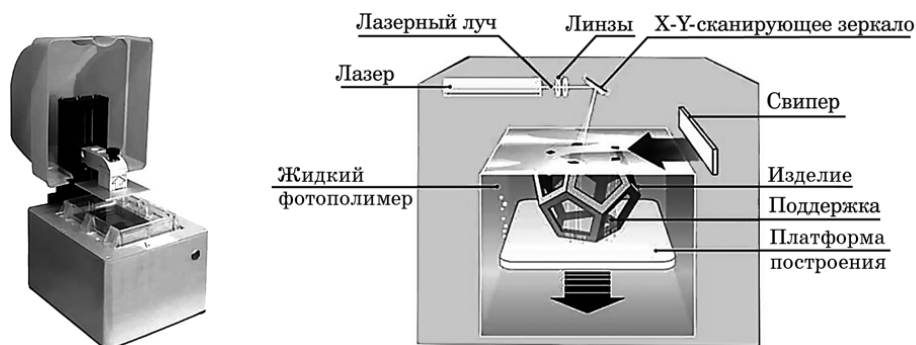


Рис. 64

Устройство 3D-принтера, работающего по SLA-технологии

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* (см. рис. 64) 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. 65).

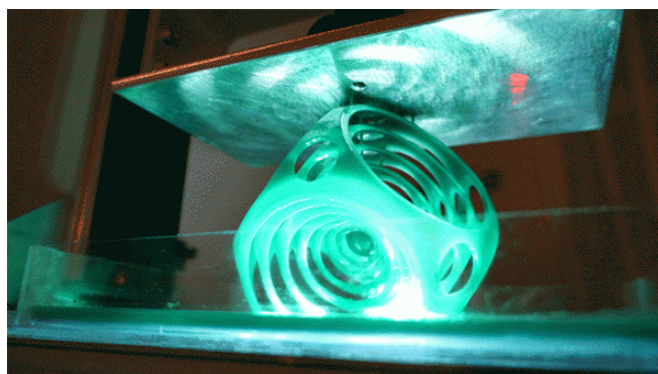


Рис. 65

Проекторная засветка фотополимерной модели на примере DLP-принтера *Kudo3D Titan*

Светодиодные 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. 66), которая может оснащаться опускаемой платформой.

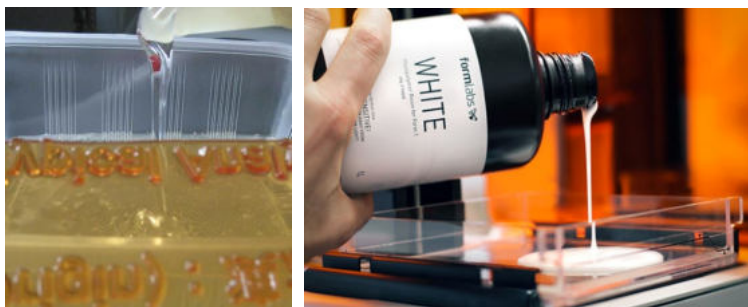


Рис. 66

Фотополимерная смола заливается в кювету

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.

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. 67)!



Рис. 67

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;
- широта 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.

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 *3D Instruments*, 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. 68).

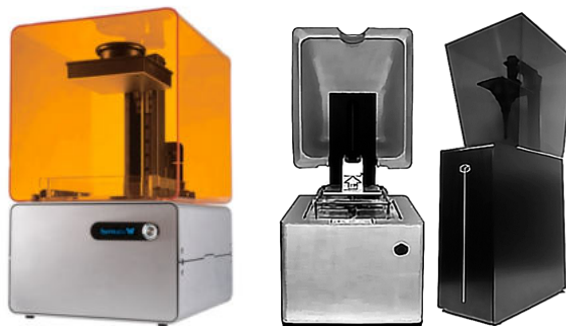


Рис. 68

Настольные стереолитографические принтеры *Formlabs Form 1*, *3D Instruments Planet Uranus* и *Kudo3D Titan 1*

Разработчик же DLP-принтера *Peachy* вообще намеревается преодолеть нижний ценовой барьер в \$1000.

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.

Лазерная стереолитография позволяет создать достаточно прочные к внешнему воздействию предметы, которые в пределе могут выдерживать нагрузку около 90 МПа. Однако они неоднородны по своим свойствам. Дело в том, что 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°C, после кипячения в течение 60 минут предел прочности по нагрузке падает до 30 МПа.

SLS — селективное (выборочное) лазерное спекание

Выборочное лазерное спекание (*Selective Laser Sintering* — 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 (*Selective Laser Melting* — 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, например, позволяет исследовать аэродинамические характеристики гоночных автомобилей.

Селективное лазерное спекание, как и многие другие промышленные методики аддитивного производства, использует в качестве материала порошки и порошковые смеси. Возможность изготовления изделий сложной формы объясняет ее популярность среди промышленных организаций со всего мира.

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. 69).

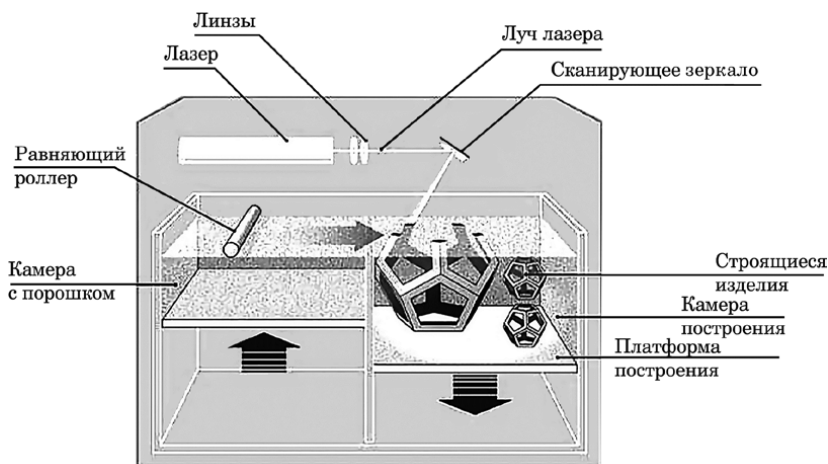


Рис. 69

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 спекает 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 спекает те области, который 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 спекания порошка: в одном случае плавят только те участки, которые соответствуют границе перехода, в другом — плавят участки по всей глубине модели. Кроме того, само спекание 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. Отсутствие поддержек дает возможность моделировать сложнейшую геометрию (как внутренних элементов, так и целого изделия), которой нельзя добиться при создании изделий традиционными методами. Кроме того, исключается риск повреждения напечатанной детали. Как результат — значительная экономия времени на сборку и средств на материалы.

Еще одна важная особенность, которую дает SLS-технология, это большой объем камер построения, что дает возможность напечатать достаточно крупные объекты или небольшую партию за одну сессию. Максимальный размер камеры в SLS 3D-принтерах — 1 м^3 .

Технология обеспечивает высокую скорость печати. Поскольку она не предполагает полное расплавление частиц материала, SLS-установки более производительны, чем другие 3D-принтеры, работающие с порошками.

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. 70).



Рис. 70

Компания *New Balance* использует технологию SLS при создании обуви для профессиональных атлетов

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. 71).



Рис. 71

Использование SLS-технологии печати полимерным порошком для создания предметов искусства

Сфера применения 3D-печати методом SLS обширна: детали силовых установок, авиастроение, машиностроение, космонавтика (рис. 72).



Рис. 72

Различные детали, изготовленные методом SLS. Материал: Белый полиамид (PA 2200).

Принтер: EOSINT P395. Размер камеры: 340×340×620 мм. Толщина слоя: 120 мкм

Основные игроки рынка промышленных SLS-машин — EOS (Германия) и 3D Systems (США). Они же предлагают серийные установки для создания самых больших объектов: 730×380×580 мм и 550×550×750 мм соответственно (рис. 73).



Рис. 73

Промышленные SLS-принтеры EOS EOSINT P 800 и 3D Systems sPro 230

Однако в 2011 году в китайском университете Хуачжонг была построена самая большая в мире SLS-машина, способная синтезировать объекты размером 1200×1200×1000 мм.

Кроме промышленных моделей широкое распространение получили профессиональные SLS-принтеры в настольном исполнении. Настольный 3D-принтер *Lisa Pro* (рис. 74) является флагманской моделью польской компании *Sinterit*. Главной особенностью принтера является встроенная камера с возможностью подачи инертного газа. Таким образом, вне зависимости от свойств рабочего материала, удастся избежать окисления материала и использовать порошок при следующей печати.

В промышленной 3D-печати расходным материалом для SLS 3D-принтеров является порошковая фракция различных полимерных материалов. По химическому составу и по характеристикам изделий на выходе различают несколько основных марок полиамида, полистирола и термопластичного полиуретана.



Рис. 74

Sinterit Lisa Pro — настольный SLS 3D-принтер, производящий большие отпечатки промышленного качества

Полиамид ПА 11 — полиамид 11, нейлон 11 (англ. PA 11, Polyamide 11, Nylon 11). Торговые марки — капрон, нейлон, анид и др. ПА 11 — кристаллизующийся полимер, относящийся к группе линейных полиамидов $[-NH-(CH_2)_{10}-CO-]_n$. Этот полимер представляет собой уникальный высококачественный полиамид, получаемый из возобновляемого источника — касторового масла. Этот материал имеет широкий спектр применения за счет своих выдающихся свойств, аналогичных свойствам полиамида 12 (ПА 12), а именно превосходной химической и термической стойкости, хорошей формоустойчивости и низкой плотности.

Полиамид ПА 12 — полиамид 12, нейлон 12 (англ. PA 12, Polyamide 12, Nylon 12). Продукт полимеризации ω -додекалактама или лауролактама $[-NH-(CH_2)_{11}-CO-]_n$. Полиамид-12 обладает высокой ударпрочностью, в том числе при низких температурах (выше, чем у полиамида-6, -66, -610). Имеет низкое влагопоглощение, высокую стабильность размеров и лучшие диэлектрические свойства, что позволяет применять его в северных широтах.

Широкое применение также находят композиционные полимерные материалы — стеклонаполненные, керамонаполненные и др.

ЛОМ — производство изделий послойным ламинированием

ЛОМ (Laminated Object Manufacturing) — изготовление слоистых моделей методом ламинирования (рис. 75).

ЛОМ — это технология создания трехмерных изделий методом послойного склеивания элементов, вырезанных из листового материала. Изготовленные по ЛОМ-технологии изделия идеально подходят для решения задач, требующих оценки формы и эстетических свойств изделий. Прочность ЛОМ-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 ЛОМ-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 изготавливаемом изделии, транслируются в систему управления процессом ЛОМ-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 термополиком. 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).

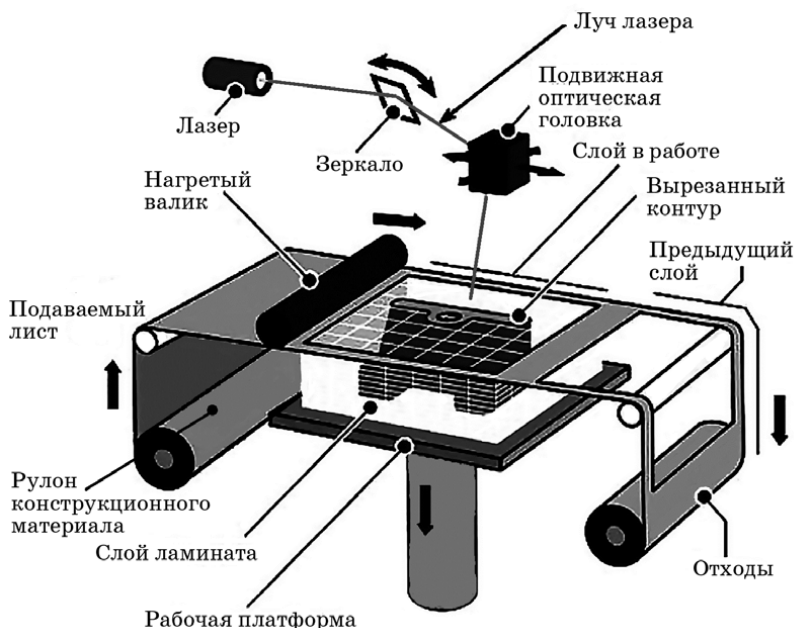


Рис. 75

Схема создания прототипа по LOM-технологии

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 3D-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 *Mcor IRIS*, позволяющий печатать полноцветные трехмерные детали из обычной офисной бумаги. Компания *Mcor Technologies* использует вариант технологии, получивший название «Выборочное ламинирование», или SDL. Этот метод предусматривает нанесения клея только в местах, входящих в состав расчетной модели, что облегчает процесс удаления лишнего материала. В отличие от стандартной технологии на основе лазерной резки, SDL использует механическую резку с помощью лезвия из карбида вольфрама. Это позволяет несколько снизить стоимость устройств.

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 (рис. 76):

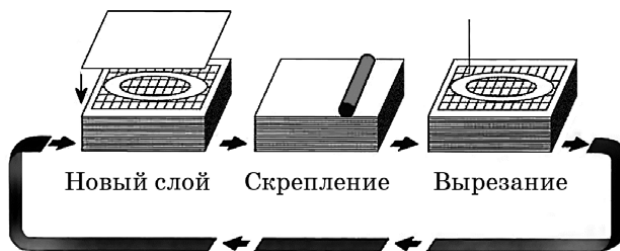


Рис. 76

Последовательность операций технологии LOM

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. Рулон материала проворачивается и поверх первого слоя накладывается

следующий слой материала, нижняя часть которого покрыта клеем (в зависимости от используемого материала). А там, где используется листовый 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. 77). Далее можно произвести дополнительную механическую обработку: шлифование, вскрытие лаком, покраска.



Рис. 77

Пост-обработка детали, изготовленной методом ламинирования:

a — ламинированный блок снимается с платформы LOM-установки; *б* — с объекта снимается обойма для освобождения кубиков ненужного материала; *в* — кубики легко отделяются от поверхности объекта; *г* — 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*.

3D-принтер компании *Mcor IRIS* (рис. 78) 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 трехмерные 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.



Рис. 78
3D-принтер Mcor Technologies — Mcor IRIS

3D-принтер *Mcor ARKe* (рис. 79) — новейшее решение для объемной трехмерной полноцветной печати с использованием обычной офисной бумаги в качестве основного расходного материала.

В отличие от других «промышленных» 3D-принтеров, представленных в линейке *Mcor*, *ARKe* — относительная компактная модель, габариты 3D-принтера 875×580×600 мм. Как и 3D-принтер *Mcor Iris*, новый 3D-принтер *Mcor ARKe* способен производить полностью цветные 3D-модели с детализованной раскраской и разрешением 4800×2400 DPI.



Рис. 79

3D-принтер *Mcor Technologies* — *Mcor ARKe*

Цена 3D-принтера *Mcor ARKe* (а она составляет сумму порядка 1 млн руб.) включает специализированное мобильное приложение от *Mcor Technologies*, с помощью которого пользователь сможет 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 самых различных областях деятельности. В первую очередь это такие области, как:

- архитектура. Изготовление макетов зданий и различных сооружений, которые могут использоваться как для дипломных работ, так и в работе строительных организаций (рис. 80);



Рис. 80

Применение LOM-технологии для изготовления макетов

- медицина. Изготовление прототипов протезов, костей, черепов и внутренних органов по результатам компьютерных исследований организма (рис. 81);



Рис. 81

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. 82);



Рис. 82

Макет здания, изготовленный по LOM-технологии

- искусство. Изготовление скульптур и объемных картин (рис. 83);



Рис. 83

Предметы искусства, изготовленные по LOM-технологии

- сувенирная продукция (рис. 84);

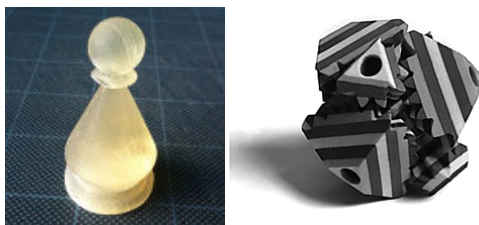


Рис. 84

Сувенирная продукция, изготовленная по LOM-технологии

- промышленность. Моделирование механизмов и прототипов (рис. 85);

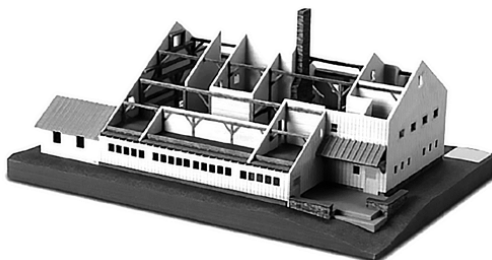


Рис. 85

Изготовление моделей промышленных объектов по LOM-технологии

- хобби. Авио-, авто-, судомоделирование и прочее (рис. 86).

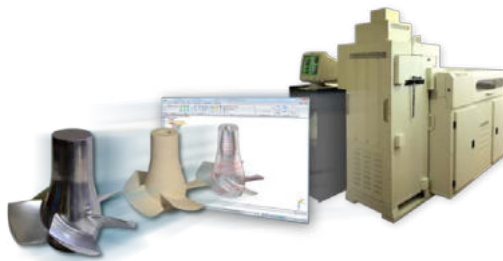


Рис. 86

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 см³.

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 (Multi Jet Modeling — 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.

Технология MJM имеет ряд особенностей:

- универсальность, поскольку для создания изделий используются различные расходные материалы;
- возможность производства объемных моделей, которые будут отличаться большой точностью;
- возможность создания объектов со сложной геометрией, при этом толщина слоя минимальна;
- пользоваться принтером может как любитель, так и профессионал;
- разнообразие сфер применения.

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 печатающей головки, оснащенной массивом сопел (рис. 87). Количество сопел в существующих моделях принтеров варьируется от 96 до 448.

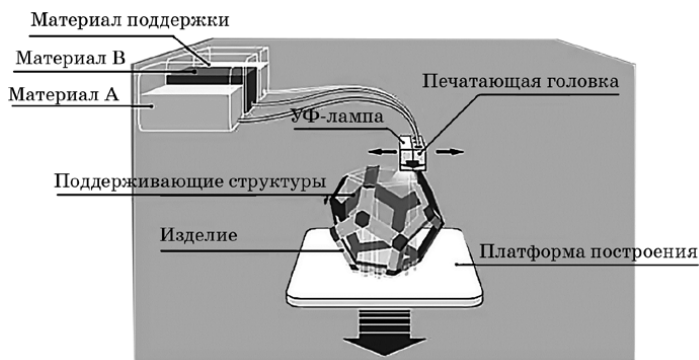


Рис. 87

Принцип 3D-печати по технологии MJM

Печатающий блок движется вдоль рабочей поверхности и наносит слои жидкого полимера. Следом за печатным блоком следует УФ-лампа, которая застывает 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°C для выплавки воска.

Технология позволяет добиваться исключительно высоких показателей точности (рис. 88), сравнимых с лазерной стереолитографией — минимальная толщина наносимого слоя может составлять 16 микрон, а разрешение печати в горизонтальной плоскости достигает 750×750×1600 DPI.

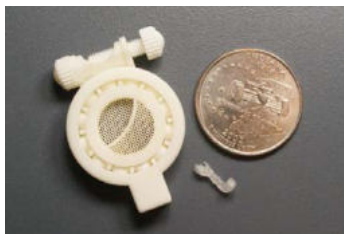


Рис. 88

Технология MJM позволяет осуществлять высокоточное прототипирование с высоким уровнем детализации

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.



Рис. 89

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 выше 100°C (рис. 89). 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. 90), включающий в себя воски и фотополимерные смолы с различными механическими свойствами.



Рис. 90

VisiJet M3 Pearlstone — материал, применяемый для создания стоматологических мастер-моделей

Так, *VisiJet DentCast* используется в качестве отливочного воска в стоматологии, *VisiJet X* служит в качестве альтернативы популярному АБС-пластику, *VisiJet Crystal* применяется для создания высокоточных литейных мастер-моделей и т. д.

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. 91).

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.



Рис. 91

3D-принтер *3D Systems ProJet 3500 CPXMax*

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 ультравысокого 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.).

Профессиональный 3D-принтер *ProJet 5000* обладает самой большой областью построения среди систем трехмерной печати MJM (рис. 92). 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.



Рис. 92

3D-принтер *3D Systems ProJet 5000*

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 16 мкм. Управляет этим процессом интуитивно понятная программа *Objet studio*TM.

Каждый слой фотополимера отверждается ультрафиолетовым излучением 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.

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 объемная модель или прототип (рис. 93).

Затвердевшую модель можно брать в руки и пользоваться ее сразу, не прибегая к дополнительной обработке. Помимо определенных материалов для моделирования, 3D-принтер использует гелеобразный опорный материал, разработанный специально для укрепления длинных выступов и элементов сложной геометрической формы.

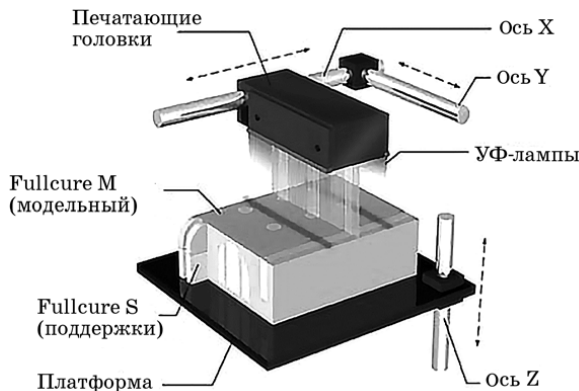


Рис. 93

Принцип печати по технологии *PolyJet*

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.

3D-принтеры, поддерживающие технологию *PolyJet*, обеспечивают наслоение толщиной до 16 микрон, с погрешностью не более 0,1 мм для гладких поверхностей. Это позволяет создавать модели сложной геометрической структуры с использованием тонких перемычек и стенок. Это единственная технология, которая поддерживает широкий спектр материалов, структура которых варьируется от мягкой до твердой, 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. 94).



Рис. 94
3D-принтер *StrataSys Objet24*

Принтер *Objet24* обладает размером лотка 240×200×150 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 детализовку. 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 ее частей. Розничная стоимость *Objet24* примерно 2 млн руб.



Рис. 95

3D-принтер *Stratasys Objet 260 Connex*

3D-принтер *Stratasys Objet 260 Connex* (рис. 95) — 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, растворяемый 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. 96) — 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.



Рис. 96
3D-принтер *Stratasys Objet 1000*

3D-принтер *Objet 1000* обладает самым большим рабочим объемом (1000×800×500 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* (рис. 97) 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.

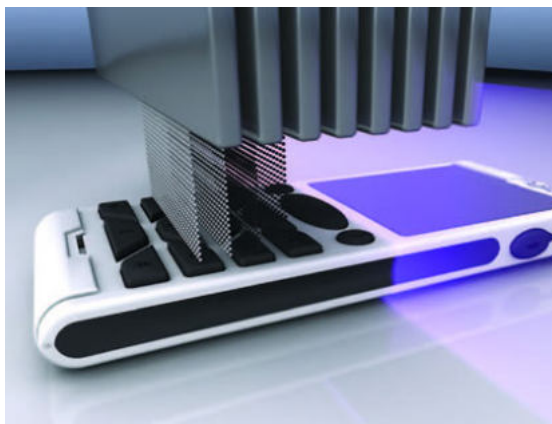


Рис. 97

Процесс изготовления изделия по технологии *PolyJet*

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. 98).

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.

Занимательно, но термины «3D-печать» и «3D-принтер» были внедрены с подачи двух студентов Массачусетского технологического института, которым пришла в голову идея модифицировать обычный струйный принтер в устройство для аддитивного производства.

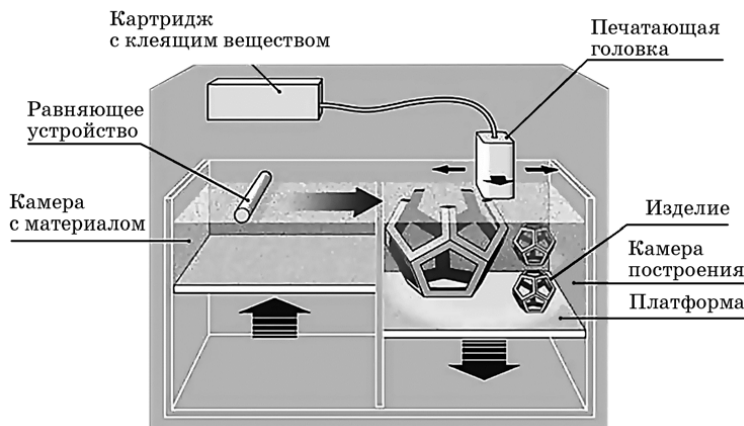


Рис. 98

Процесс 3D-печати по технологии 3DP

В 1995 году Джим Бредт и Тим Андерсон, которые уже запатентовали свою разработку, создали компанию *ZCorporation Inc* и наладили выпуск первых принтеров, работающих по технологии струйной 3D-печати (3DP). За 20 лет существования эта технология успела сменить владельца и приобрести ряд усовершенствований. В 2012 году технологию 3DP вместе с фирмой *ZCorporation Inc* пожелала приобрести корпорация *3D systems*. Под ее брендом бывшие модели *ZCorporation Inc* сегодня продаются по всему миру.

Американское общество по испытанию материалов (ASTM International) разделило технологии струйной трехмерной печати на две категории:

- material jetting — разбрызгивание материала;
- binder jetting — разбрызгивание связующего.

В первом случае через сопла подается непосредственно сам строительный материал, который после нанесения отвердевает. Во втором — на тонкий слой гипсового, полимерного или металлического порошка разбрызгивается клеящее вещество. Технология 3DP в своем изначальном виде представляла именно второй способ.

По своей сути процесс получения 3D-детали по струйной технологии 3DP 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 ра-

боты такой движущейся печатающей головки в гипсовый порошок материал поступает клеящее вещество. В местах попадания клеящего вещества порошок 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.

Разновидностью струйной трехмерной печати является цветная струйная печать (*Color Jet Printing* — CJP) — фирменная технология компании *3D Systems*.

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

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

Технология CJP применяется в основном для прототипирования изделий сложной геометрической формы и цветовой гаммы, а также для производства мелкосерийных партий готовых изделий в медицине, промышленном дизайне, образовании, архитектурном дизайне и даже в кукольной мультипликации.

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

Оборудование 3DP

Принтер разделен на две основные камеры: для хранения порошка (слева) и для построения модели, каждая из которых снабжена подвижной платформой. В начале процесса первое отделение заполнено материалом, а второе — пустое, чтобы начать печать, тонкий слой порошка при помощи выравнивающего ролика перемещается из первой камеры во вторую. Далее печатающая головка, имеющая множество сопел, наносит в нужных местах связующее вещество. После этого платформа рабочей камеры опускается на толщину слоя вниз, а отделения с порошком — поднимается вверх, и все повторяется.

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.

Необходимо отметить, что в цветном 3D-принтере от *ZCorporation ZPriner Z650* (рис. 99) установлены 4 струйные головки с чернилами основных цветов, так что полученная модель может воспроизводить не только форму, но и окраску получаемого прототипа.



Рис. 99

3D-принтер от *ZCorporation ZPriner Z650* и его современный аналог
3D SYSTEMS ProJet CJP 660Pro

В следующей модели — *ZPriner Z660* — уже само клеящее вещество поставляется в различных основных цветах.

Среди изделий *3D Systems* можно выделить *ProJet CJP 260Plus* — самый доступный цветной 3D-принтер (рис. 100).



Рис. 100

Модель принтера *3D Systems ProJet CJP 260Plus*

Этот принтер, работающий по технологии CJP, пользуется наибольшей популярностью среди дизайнеров, архитекторов, инженеров, которым для работы требуется качество и скорость печати. Он обеспечивает хорошую цветопередачу и точность до 0,1 мм. Материал — композитный порошок. Легкость и компактность — два преимущества, которые выгодно подчеркивают 3D-принтер *ProJet CJP 260Plus*. Устройство может легко использоваться в обычных офисах, обеспечивая сотрудникам простоту и удобство своего применения.

Одним из направлений компании *ExOne* (США) является выпуск 3D-принтеров, которые используют эту же технологию. Эта фирма была основана в

2005 году как дочерняя организация корпорации *Extrude Hone Corporation*. Используя патенты, полученные Андерсоном и Бредтом, они наладили выпуск линейки принтеров *M-Flex*, которые сегодня печатают даже металлические изделия (рис. 101).

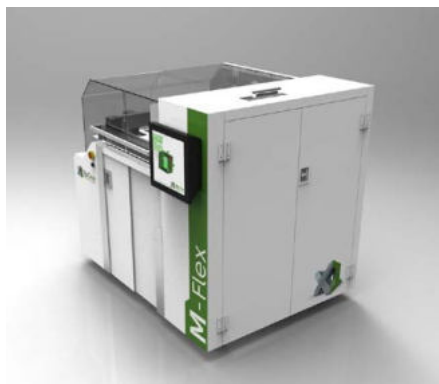


Рис. 101

Модель принтера *M-Flex* от компании *ExOne*

ExOne M-Flex — промышленное устройство для трехмерной печати (3DP). Принтер позволяет создавать модели из широкого ассортимента материалов, включая металлы, стекло, песочные смеси и др. Напечатанные модели обжигаются для спекания частиц расходного материала и удаления связующего полимера, а затем при необходимости пропитываются новым связующим материалом высокой прочности и долговечности. Все перечисленные операции включены в производственный цикл устройства. Размер изготавливаемых моделей достигает 400×250×250 мм с минимальной толщиной слоя в 100 мкм. Установка M-Flex проста в использовании и включает в себя все, что необходимо для построения сложных деталей.

Используемые материалы для 3DP-печати

При 3D-печати по технологии 3DP традиционно использовался гипс, а роль связующего вещества в этом случае играла вода. Однако технологии шагнули вперед и теперь также используют металлы (бронза, медь), песчаные и полимерные смеси. В связующее вещество подмешиваются красители, благодаря чему на таком 3D-принтере становится возможным осуществлять цветную печать.

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

Стоимость простейших порошков составляет в среднем 600–700 евро за ведро 10 кг (8200 см³), цена связующего вещества — около 660 евро за 3,8 л.

Модели, изготовленные из гипса и полимеров, обладают не слишком высокой прочностью для того, чтобы использовать их в производственном цикле, как пресс-форму, однако вполне подойдут для быстрой визуализации прототипов различных деталей и изделий. Также они могут применяться в различных архитектурных и проектных работах или при изготовлении сувениров.

Изделия с использованием металлов обладают лучшими свойствами, однако их прочность все еще остается на среднем уровне: прочность на растяжение — 610 МПа, твердость — 10–20 единиц по шкале Роквелла.

Такие характеристики вполне подойдут для изготовления пресс-форм для литья пластмасс, которые могут выдержать от 200 до 500 тыс. производственных циклов. Также их используют для изготовления деталей, которые работают в условиях трения — валы, втулки, зубчатые передачи и т. д.

Преимущества технологии 3DP:

- высокая скорость построения деталей — около 6 мм по высоте в час, при размере рабочей зоны 780×400 мм это составит 1780 см куб., что на порядок превосходит лазерные технологии быстрого прототипирования;
- сравнительно небольшая стоимость расходных материалов.

Недостатки технологии 3DP:

- изделия на гипсовой основе довольно хрупкие и могут использоваться только в узкой сфере деятельности. В качестве пресс-формы могут быть использованы только один раз, после чего разрушаются;
- при работе с гипсовыми порошками возникает много пыли, поэтому нужна хорошая вытяжка.

Принтеры, использующие технологию струйной трехмерной печати, это одно из возможных решений по реализации задачи быстрого прототипирования. Следует отметить, что несмотря на некоторые недостатки она все же нашла сегодня место на рынке и продолжает активно развиваться наряду с множеством своих конкурентов.

CLIP — непрерывное изготовление в жидком интерфейсе

Не так давно амбициозная американская компания *Carbon3D* явила миру революционную 3D-печать — технологию CLIP (рис. 102).

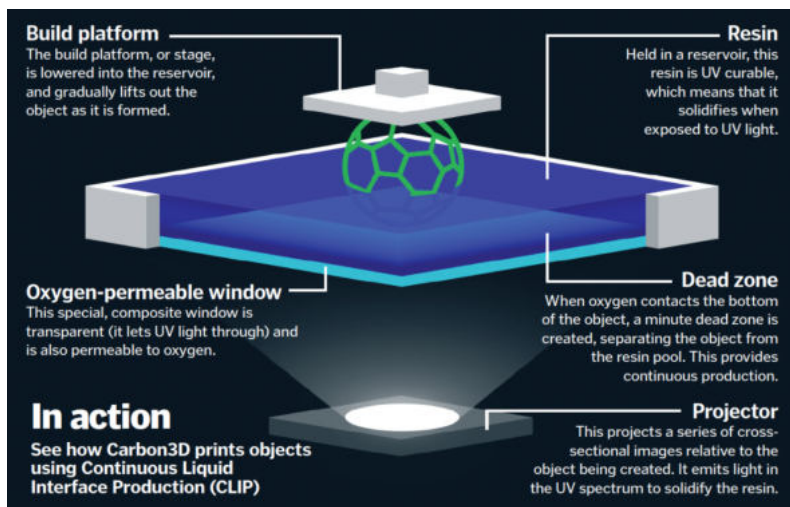


Рис. 102

3D-печать по технологии CLIP

Carbon3D — частная компания из Калифорнии (США), основанная в 2013 году. С момента своего создания *Carbon3D* занималась разработками инновационного метода 3D-печати, способного совершить революцию в этой сфере. Новую технологию назвали CLIP (Continuous Liquid Interface Production), и принцип ее действия заключается в использовании света и кислорода для отверждения светочувствительной смолы. По описанию метод схож с привычной и широко известной стереолитографией (SLA), где для отверждения светочувствительной смолы применяется лазер или светодиодный прожектор, однако новая технология имеет ряд существенных отличий.

С помощью традиционных технологий 3D-печати, в том числе и стереолитографии, объекты печатаются слой за слоем, что значительно сокращает скорость производства и приводит к созданию хрупких предметов, похожих по своей структуре на сланец. С другой стороны, в новой технологии для отверждения смолы используется свет, а в качестве подавляющего агента — кислород. Таким образом, объекты непрерывно печатаются в трехмерном виде.

Если расшифровать название дословно, получим Continuous Liquid Interface Production (непрерывное изготовление в жидком интерфейсе). 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.

В отличие от всех существующих 3D-технологий, «печать» происходит не послойно, а непрерывно, путем взаимодействия ультрафиолетового излучения (способствует полимеризации) и кислорода (замедляет реакцию) с мономером. 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. 103).

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 микроигл и других систем подачи лекарственных средств больным.



Рис. 103

Процесс создания изделия по CLIP-технологии

Оборудование CLIP

Компания *Carbon3D*, создавшая технологию скоростной стереолитографической печати CLIP, заручилась поддержкой крупного производителя автомобильных комплектующих: компания *Delphi Corporation*, один из главных поставщиков *General Motors*, взялась за аддитивное производство функциональных прототипов и мелких партий готовых изделий с помощью установок *Carbon M1* (рис. 104).

На международной выставке промышленных технологий IMTS 2018 в Чикаго американская компания *Carbon3D* показала в действии автоматизированную систему *SpeedCell*, состоящую из нескольких устройств сверхбыстрой 3D-печати *Carbon M2*, печатающих по технологии CLIP, станции промывки и робота-манипулятора для обслуживания всей системы. Система предназначена для скоростной печати готовых деталей на производстве, но может печатать и прототипы.



Рис. 104

3D-принтер корпорации *Carbon3D* — *Carbon M1*

Система *SpeedCell* легко масштабируется и может быть использована как для прототипирования, так и серийного изготовления деталей.

В основе системы *SpeedCell* — 3D-принтеры *Carbon M2* (рис. 105), работающие по технологии CLIP. Метод непрерывной печати в жидкой среде был запатентован в 2014 году и на сегодня это самый быстрый метод фотополимерной печати, превосходящий по скорости SLA и DLP в десятки раз.



Рис. 105

Система 3D-печати *SpeedCell*

Помимо *SpeedCell* компания *Carbon3D* представила на выставке IMTS 2018 еще и обновленный ассортимент расходных материалов для линейки своих принтеров, в который вошли как стандартные фотополимеры, так и специализированные смолы. В ассортимент *Carbon3D* также входят материал для стоматологов, силиконовый фотополимер и биосовместимый полиуретан для медицинских целей, который уже получил одобрение американского Управления по контролю за продуктами и лекарствами.

Настольный аналог уменьшенного размера, работающий по собственной похожей технологии, выпускает компания *XYZprinting*: это принтеры серии *xPF*. В основе моделей *MfgPro* серии *xPF* — новейшая технология печати *Lubricant Sublayer Photocuring* (LSPc), аналог известной технологии CLIP от *Carbon3D*. LSPc была разработана в стенах калифорнийской компании *Nexa3D*.



Рис. 106

3D-принтер модели *MfgPro 1600 xPF*

Принципиальных отличий от технологии CLIP нет, она также печатает с невероятной скоростью, используя свет и кислород для «frosta» объектов. Но эта инновация в финансовом плане доступнее, чем высокоскоростная печать *Carbon3D*, и предназначена для более широкого применения. На данный мо-

мент две компании объединили усилия по продвижению на рынке технологии и устройств на ее основе.

3D-принтеры *MfgPro180*, *MfgPro 220 xPF* и *MfgPro 1600 xPF* (рис. 106) найдут применение везде, где требуется скоростное изготовление кастомных деталей, малые серии которых невыгодно изготавливать традиционными способами, а это множество самых разных отраслей — от реставрационных работ и ювелирной промышленности до автопрома и аэрокосмических исследований. Стоимость этих устройств начинается от 20 тысяч долларов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. Все о 3D-печати. Аддитивное производство. Основные понятия / 3D Today, 3D-Wiki. — URL: https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology/.
2. Технология 3D-прототипирования. Что это такое? / 3DProfy, Апрель 2nd, 2015. — URL: <http://3dprofy.ru/tekhnologiya-3d-prototipirovaniya-chto-eto-takoe/>.
3. Что такое 3D-печать? / 3DProfy, Сентябрь 15th, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/chto-takoe-3d-pechat/>.
4. Обзор современных 3D-принтеров / 3DProfy, Сентябрь 15th, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/obzor-sovremennykh-3d-printerov/>.
5. Многоструйное моделирование (МММ): технология настоящего и будущего / 3DProfy, Сентябрь 15th, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/mnogostrujnoe-modelirovanie-mjm-tekhno/>.
6. Цифровая светодиодная проекция (DLP) в 3D-печати / 3DProfy, Сентябрь 19th, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/cifrovaya-svetodiodnaya-proekciya-dlp-v-3d-pe/>.
7. Цветная струйная 3D-печать (CJP) / 3DProfy, Сентябрь 19th, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/cvetnaya-strujnaya-3d-pechat-cjp/>.
8. Стереолитография (SLA) / 3DProfy, Сентябрь 30th, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/stereolitografiya-sla/>.
9. Моделирование методом послойного наплавления (FDM) / 3DProfy, Октябрь 10st, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/modelirovanie-metodom-poslojnego-na/>.
10. Изготовление объектов методом ламинирования (LOM) / 3DProfy, Октябрь 10st, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/izgotovlenie-obektov-metodom-lamin/>.
11. Фотополимерный 3D-принтер / 3DProfy, Октябрь 21st, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/fotopolimernyj-3d-printer/>.
12. 3D-принтеры FDM / 3DProfy, Октябрь 21st, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/3d-printery-fdm/>.
13. Струйная трехмерная печать (3DP) / 3DProfy, Октябрь 21st, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/strujnaya-trekhmernaya-pechat-3dp/>.
14. Расходные материалы для моделирования методом послойного наплавления (FDM/FFF) / 3DProfy, Октябрь 21st, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/raskhodnye-materialy-dlya-modelirovan/>.
15. Расходные материалы для фотополимерной 3D-печати / 3DProfy, Ноябрь 26th, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/raskhodnye-materialy-dlya-fotopolimer/>.
16. Обзор бесплатного ПО для 3D-моделирования / 3DProfy, Декабрь 13th, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/obzor-besplatnogo-po-dlya-3d-modelirova/>.
17. 3D-сканеры обзор основных технологий / 3DProfy, Декабрь 13th, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/3d-skanyer-obzor-osnovnykh-tekhnologij/>.
18. 3D-редакторы с поддержкой .stl / 3DProfy, Декабрь 13th, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/3d-redaktory-s-podderzhkoj-stl/>.

19. 3D-принтер PrintBox3D One — популярный российский 3D-принтер / 3DProfy, Декабрь 13th, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/3d-printer-printbox3d-one-populyarnyj-rossijskij-3d-p/>.
20. 14 способов борьбы с заворачиванием при 3D-печати / 3DProfy, Декабрь 13th, 2014. — URL: <http://3dprofy.ru/14-sposobov-borby-s-zavogachivaniem-pri/>.
21. Обработка распечатанных моделей после 3D-печати / 3DProfy, Январь 8th, 2015. — URL: <http://3dprofy.ru/obrabotka-raspechatannykh-modelej-pos/>.
22. Обзор принтера RepRap Prusa i3 / 3DProfy, Февраль 7th, 2015. — URL: <http://3dprofy.ru/obzor-printera-reprap-prusa-i3/>.
23. 3D-принтер PrintBox3D One / 3DProfy, Февраль 7th, 2015. — URL: <http://3dprofy.ru/3d-printer-printbox3d-one/>.
24. Промышленный 3D-принтер / 3DProfy, Апрель 2nd, 2015. — URL: <http://3dprofy.ru/promyshlennyj-3d-printer/>.
25. Технология скоростной 3D-печати CLIP нашла применение в автомобильной отрасли / 3D Today, Июнь 5th, 2016. — URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/technology-highspeed-3d-printing-clip-has-found-application-in-the-aut/>.
26. Новинки XYZprinting на IMTS 2018: 3D-принтеры и роботы / Top 3D Shop, Ноябрь 16th, 2018. — URL: <https://top3dshop.ru/blog/xyzprinting-na-imts-2018.html>.
27. 3D-принтеры Carbon M2 и роботы: скоростная 3D-печать / Top 3D Shop, Ноябрь 30th, 2018. — URL: <https://habr.com/ru/company/top3dshop/blog/431424/>.
28. *Lee, K-W.* Poly (propylene fumarate) Bone Tissue Engineering Scaffold Fabrication Using Stereolithography: Effects of Resin Formulations and Laser Parameters / K-W. Lee, S. Wang, B. C. Fox [et al.] // *Biomacromolecules*. — 2007. — V. 8. — № 4. — P. 1077–1084.
29. *Li, L.* Multiphoton polymerization / L. Li, J. T. Fourkas // *Materials Today*. — 2007. — V. 10. — № 6. — P. 30–37.
30. *Mills, B.* Single-pulse multiphoton polymerization of complex structures using a digital multimirror device / B. Mills, J. A. Grant-Jacob, M. Feinaeugle [et al.] // *Optics Express*. — 2013. — V. 21. — № 12. — P. 14853–14858.
31. *Лысыч, М. Н.* Области применения технологий 3D-печати / М. Н. Лысыч, М. Л. Шабанов М.Л., В. В. Романов // *Современные наукоемкие технологии*. — 2014. — № 12-2. — С. 165–169.
32. *Баева, Л. С.* Современные технологии аддитивного изготовления объектов / Л.С. Баева, А. А. Маринин // *Вестник МГТУ*. — 2014. — Т. 17. — № 1. — С. 7–12.
33. *Елистратова, А. А.* Технологии 3D-печати: преимущества и недостатки / А. А. Елистратова, И. С. Коршакевич // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. — 2015. — Т. 1. — С. 557–559.
34. *Gay, P.* Analysis of Factors Influencing the Mechanical Properties of Flat PolyJet Manufactured Parts / P. Gay, D. Blanco, F. Pelayo, A. Noriega [et al.] // *Procedia Engineering*. — 2015. — V. 132. — P. 70–77.
35. *Beltrán, N.* Characterization of Factors Influencing Dimensional and Geometric Errors in PolyJet Manufacturing of Cylindrical Features / N. Beltrán,

F. Carriles, B. J. Álvarez [et al.] // *Procedia Engineering*. — 2015. — V. 132. — P. 62–69.

36. *Литунов, С. Н.* Обзор и анализ аддитивных технологий / С. Н. Литунов, В. С. Слободенюк, Д. В. Мельников. — Ч. 1 // *Омский научный вестник*. — 2016. — № 1 (145). — С. 12–17.

37. *Литунов, С. Н.* Обзор и анализ аддитивных технологий / С. Н. Литунов, В. С. Слободенюк, Д. В. Мельников [и др.]. — Ч. 2 // *Омский научный вестник*. — 2016. — № 5 (149). — С. 20–24.

38. *Степанова, Е. Ю.* Прорывные технологии нового поколения формообразования пространственно-сложных поверхностей наукоемких изделий / Е. Ю. Степанова, Г. В. Барсуков, Ю. С. Степанов // *Известия ТулГУ. Технические науки*. — 2016. — Вып. 8. — № 2. — С. 243–249.

39. *Liu, Y.* Precise 3D-printing of micro/nanostructures using highly conductive carbon nanotube-thiol-acrylate composites / Y. Liu, W. Xiong, L. J. Jiang [et al.] // *Laser 3D Manufacturing III*, edited by Bo Gu, Henry Helvajian, Alberto Piqué, *Proc. of SPIE*. — V. 9738. — P. 973808 (1–9).

40. *Игонина, Е. В.* Особенности разработки и применения FDM-технологии при создании и прототипировании 3D-объектов / Е. В. Игонина, О. В. Дружинина // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. — 2017. — Т. 13. — № 2. — С. 185–193.

41. *Голубничая, Я. Р.* Перспективные технологии 3D-печати / Я. Р. Голубничая, Н. Е. Проскуряков // *Известия ТулГУ. Технические науки* — 2017. — Вып. 9. — № 1. — С. 403–408.

42. *Hosseiniabadi, H. G.* Plasticity in polymeric honeycombs made by photopolymerization and nozzle based 3D-printing / H. G. Hosseiniabadi, R. Bagheri, L. A. Gray [et al.] // *Polymer Testing*. — 2017. — V. 63. — P. 163–167.

43. *Ligon, S. C.* Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing / S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl [et al.] // *Chem. Rev.* — 2017. — V. 117. — P. 10212–10290.

44. *Lee, J.* A Review on 3D Printed Smart Devices for 4D Printing / J. Lee, H.-C. Kim, J.-W. Choi [et al.] // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. — 2017. — V. 4. — № 3. — P. 373–383.

45. *Петров, А. К.* Основные направления развития аддитивных технологий для печати объектов с микронным разрешением // *Неорганические материалы*. — 2017. — Т. 53. — № 12. — С. 1378–1388.

46. *Araya-Calvo, M.* Evaluation of compressive and flexural properties of continuous fiber fabrication additive manufacturing technology / M. Araya-Calvo, I. López-Gómez, N. Chamberlain-Simon [et al.] // *Additive Manufacturing*. — 2018. — V. 22. — P. 157–164.

47. *Heras, E. S.* Filament Advance Detection Sensor for Fused Deposition Modelling 3D-Printers / E. S. Heras, F. B. Haro, J. M. De Agustín del Burgo [et al.] // *Sensors*. — 2018. — V. 18. — № 5. — 1495 (1–11).

48. *Sutton, J. T.* Lignin-Containing Photoactive Resins for 3D Printing by Stereolithography / J. T. Sutton, K. Rajan, D. P. Harper [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces* — 2018. — V. 10. — № 42. — P. 36456–36463.

49. *Vaithilingam, J.* 3-Dimensional inkjet printing of macro structures from silver nanoparticles / J. Vaithilingam, E. Saleh, L. Körner [et al.] // *Materials & Design*. — 2018. — V. 139. — P. 81–88.
50. *Chacóna, J. M.* Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties / J. M. Chacóna, M. A. Caminero, P. J. Núñez [et al.] // *Composites Science and Technology*. — 2019. — V. 181. — P. 107688 (1–18).
51. *Wang, J.* Ink-based 3D printing technologies for graphene-based materials: A review / J. Wang, Y. Liu, Z. Fan [et al.] // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. — 2019. — V. 2. — № 1. — P. 1–33.
52. *Fidan, I.* The trends and challenges of fiber reinforced additive manufacturing / I. Fidan, A. Imeri, A. Gupta [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2019. — V. 102. — P. 1801–1818.
53. *Wu, H.* Additive Manufacturing of Flame-retardant Polyamide-6 Nanocomposites Via Fused Filament Fabrication (FFF) / H. Wu, A. Kafí, H. Kim [et al.] // *SAMPE 2019*. — May 20–23, 2019. — Charlotte, NC, USA. — P. 1–15.
54. *Khan, I.* The Exploitation of Polymer Based Nanocomposites for Additive Manufacturing: A Prospective Review / I. Khan, C. S. Kamma-Lorger, S. D. Mohan [et al.] // *Applied Mechanics and Materials* — 2019. — V. 890. — P. 113–145.
55. *Moore, D. G.* Three-dimensional printing of multicomponent glasses using phase-separating resins / D. G. Moore, L. Barbera, K. Masania [et al.] // *Nat. Mater.* — 2019. — P. 1–8.
56. *Nawafleh, N.* Additive manufacturing of kevlar reinforced epoxy composites / N. Nawafleh, J. Chabot, M. Aljaghtam [et al.] // *IMECE 2019*. — November 11–14, 2019. — Salt Lake City, UT, USA. — P. 1–4.
57. *Kuznetsov, V. E.* Desktop Fabrication of Strong Poly (Lactic Acid) Parts: FFF Process Parameters Tuning / V. E. Kuznetsov, A. G. Tavitov, O. D. Urzhumtsev [et al.] // *Materials* — 2019. — V. 12. — P. 2071 (1–22).
58. *Caminero, M. Á.* Additive Manufacturing of PLA-Based Composites Using Fused Filament Fabrication: Effect of Graphene Nanoplatelet Reinforcement on Mechanical Properties, Dimensional Accuracy and Texture / M. Á. Caminero, J. M. Chacón, E. García-Plaza [et al.] // *Polymers*. — 2019. — V. 11. — P. 799 (1–22).
59. *Peplow, M.* 3-D printer can build meter-tall objects in just a few hours // *C&EN Global Enterprise*. — 2019. — V. 97. — № 43. — P. 10.
60. *Lahtinen, E.* Fabrication of Porous Hydrogenation Catalysts by a Selective Laser Sintering 3D Printing Technique / E. Lahtinen, L. Turunen, M. M. Hänninen [et al.] // *ACS Omega*. — 2019. — V. 4. — P. 12012–12017.
61. *Wagner, A.* Foamable acrylic based ink for the production of light weight parts by inkjet-based 3D printing / A. Wagner, A. M. Kreuzer, L. Göpperl [et al.] // *European Polymer Journal* — 2019. — V. 115. — P. 325–334.
62. *Tey, J. Y.* Development of 3D printer for functionally graded material using fused deposition modelling method / J. Y. Tey, D. Teh, W. H. Yeo [et al.] // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. — 2019. — V. 268. — P. 1–6.
63. *Dutra, T. A.* Mechanical characterization and asymptotic homogenization of 3D - printed continuous carbon fiber - reinforced thermoplastic / T. A. Dutra,

R. T. L. Ferreira, H. B. Resende [et al.] // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. — 2019. — V. 41. — P. 133 (1–15).

64. *Horst, D. J.* 3D-Printed Conductive Filaments Based on Carbon Nanostructures Embedded in a Polymer Matrix : A Review / D. J. Horst, P. P. Andrade // International Journal of Applied Nanotechnology Research. — 2019. — V. 4. — № 1. — P. 26–40.

65. *Koons, G. L.* Progress in three-dimensional printing with growth factors / G. L. Koons, A. G. Mikos // Journal of Controlled Release. — 2019. — V. 295. — P. 50–59.

66. *Chen, T-C. T.* A three-dimensional-printing-based agile and ubiquitous additive manufacturing system / T-C. T. Chen, Y-C. Lin // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. — 2019. — V. 55. — Part A. — P. 88–95.

67. *Liu, C-C.* Three-dimensional printing technology: An aid for preoperative airway evaluation in patient with situs inversus totalis / C-C. Liu, Y-C. Huang, P-H. Yeh // Journal of Clinical Anesthesia. — 2019. — V. 54. — P. 55–56.

68. *He, H.* Machine learning for continuous liquid interface production: Printing speed modelling / H. He, Y. Yang, Y. Pan // Journal of Manufacturing Systems. — 2019. — V. 50. — P. 236–246.

69. *Zhou, Z.* High-throughput characterization of fluid properties to predict droplet ejection for three-dimensional inkjet printing formulations / Z. Zhou, L. R. Cantu, X. Chen [et al.] // Additive Manufacturing. — 2019. — V. 29. — P. 100792 (1–10).

70. *McGregor, D. J.* Mechanical properties of hexagonal lattice structures fabricated using continuous liquid interface production additive manufacturing / D. J. McGregor, S. Tawfick, W. P. King // Additive Manufacturing. — 2019. — V. 25. — P. 10–18.

71. *Hu, B.* Improved design of fused deposition modeling equipment for 3D printing of high-performance PEEK parts / B. Hu, X. Duan, Z. Xing [et al.] // Mechanics of Materials. — 2019. — V. 137. — P. 103139 (1–8).

72. *Bekas, D. G.* 3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites : A review / D. G. Bekas, Y. Hou, Y. Liu [et al.] // Composites. Part B : Engineering. — 2019. — V. 179. — P. 107540 (1–40).

73. *Kabir, S. M. F.* A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties / S. M. F. Kabir, K. Mathur, A. M. Seyam // Composite Structures. — 2020. — V. 232. — P. 111476 (1–19).

74. *Carreño-Morelli, E.* Three-dimensional printing of hard materials / E. Carreño-Morelli, P. Alveen, S. Moseley [et al.] // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. — 2020. — V. 87. — P. 105110 (1–6).

75. *Lawson, S.* Recent Advances in 3D Printing of Structured Materials for Adsorption and Catalysis Applications / S. Lawson, X. Li, H. Thakkar [et al.] // Chem. Rev. — 2021. — V. 121. — № 10. — P. 6246–6291.

76. Основы технологии переработки пластмасс : учебник для вузов / С. В. Власов, Л. Б. Кандырин, В. Н. Кулезнев [и др.]. — М. : Химия, 2004. — 600 с.

77. Производство изделий из полимерных материалов : учеб. пособие / В. К. Крыжановский, М. Л. Кербер, В. В. Бурлов [и др.]. — СПб. : Профессия, 2004. — 464 с.

78. Переработка пластмасс / О. Шварц, Ф. Эбелинг, Б. Фурт ; под общ. ред. А. Д. Пониматченко. — СПб. : Профессия, 2005. — 320 с.

79. Доступная 3D-печать для науки, образования и устойчивого развития / ред. Э. Канесса, К. Фонда, М. Зеннаро. — Абдус Салам : Международный центр теоретической физики, 2013. — 192 с.

80. Бобович, Б. Б. Полимерные конструкционные материалы (структура, свойства, применение): учебное пособие / Б. Б. Бобович. — М. : ФОРУМ: ИНФРА-М, 2014. — 400 с.

81. *Barnatt, Ch.* 3D Printing. — 2nd ed. — CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014. — 306 p.

82. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. — М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. — 220 с.

83. *Строганов, Р.* 3D печать. Коротко и максимально ясно / Р. Строганов. — LittleTinyH Books, 2016. — 73 с.

84. *Шкуро, А. Е.* Технологии и материалы 3D-печати : учеб. пособие / А. Е. Шкуро, П. С. Кривоногов. — Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. — 98 с.

85. *Грибовский, А. А.* Аддитивные технологии и быстрое производство в приборостроении : учеб. пособие / А. А. Грибовский, А. И. Щеколдин. — СПб. : Университет ИТМО, 2018. — 48 с.

86. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники : учеб. пособие для вузов / А. Л. Галиновский, Е. С. Голубев, Н. В. Коберник [и др.] ; под общ. ред. А. Л. Галиновского. — М. : Юрайт, 2021. — 115 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ЧТО ТАКОЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ?	4
Преимущества аддитивных технологий	4
Аддитивное производство: технологии и материалы	7
ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	13
Понятие полимерных материалов	13
Основные сведения о полимерных материалах	13
Групповая классификация и типизация полимерных материалов	14
Радикальная полимеризация	21
Фотохимическое инициирование	23
Процесс полимеризации	26
Основы реологии расплавов полимеров	28
Основные виды деформации	28
Упругая и пластическая деформация	29
Экструзия как базовый процесс для аддитивных технологий	34
ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ	39
История и эволюция 3D-печати	39
Состояние до 1980 года	41
Физическое начало 3D-печати: 1981–1990 годы	42
Стадия развития I: 1991–2000 годы	42
Стадия развития II: 2001–2010 годы	43
Зрелая стадия: с 2011 года по сегодняшний день	43
FDM — моделирование методом осаждения расплавленной нити	45
Технология FDM-печати	45
Рабочая платформа.....	51
Механизмы позиционирования	53
Управление	54
Разновидности FDM-принтеров	56
CFF — метод непрерывного армирования волокнами	62
Материалы для FDM-печати	67
SLA — лазерная стереолитография	72
Лазеры и проекторы	74
Кювета и смола	76
Разновидности стереолитографических принтеров	78
SLS — селективное (выборочное) лазерное спекание	79
Технология.....	79
Материалы и применение.....	81
LOM — производство изделий послойным ламинированием	83
История возникновения LOM-технологии	84
Технология 3D-печати методом ламинирования	85
Особенности технологии LOM	86
Используемые материалы и оборудование	87

Сферы применения метода ламинирования	88
Стоимость изделий	91
Преимущества и недостатки LOM 3D-печати	91
MJM — технология многоструйного моделирования	91
Процесс	92
Особенности технологии MJM	93
Материалы и оборудование	93
Технология PolyJet	95
История технологии	96
Используемые материалы и оборудование	97
Процесс PolyJet Matrix	100
Преимущества и недостатки технологии	101
3DP — струйная технология 3D-печати	101
Оборудование 3DP	103
Используемые материалы для 3DP-печати	105
CLIP — непрерывное изготовление в жидком интерфейсе	106
Оборудование CLIP	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
ЛИТЕРАТУРА	112

Алексей Алексеевич ЛЯПКОВ,

Анна Алексеевна ТРОЯН

ПОЛИМЕРНЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

Зав. редакцией
литературы по химии, пищевой биотехнологии
и технологии продуктов питания *Т. В. Карпенко*

Ответственный редактор *В. В. Яески*

Подготовка макета *Д. А. Вакулова*

Корректор *Л. Ю. Киреева*

Выпускающий *В. А. Иутин*

ЛР № 065466 от 21.10.97

Гигиенический сертификат 78.01.10.953.П.1028

от 14.04.2016 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»

lan@lanbook.ru; www.lanbook.com

196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, д. 1, лит. А

Тел./факс: (812) 336-25-09, 412-92-72

Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

ГДЕ КУПИТЬ

ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИЙ:

*Для того чтобы заказать необходимые Вам книги, достаточно обратиться
в любую из торговых компаний Издательского Дома «ЛАНЬ»:*

по России и зарубежью

«ЛАНЬ-ТРЕЙД». 196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, д. 1, лит. А

тел.: (812) 412-85-78, 412-14-45, 412-85-82; тел./факс: (812) 412-54-93

e-mail: trade@lanbook.ru; ICQ: 446-869-967

www.lanbook.com

пункт меню «Где купить»

раздел «Прайс-листы, каталоги»

в Москве и в Московской области

«ЛАНЬ-ПРЕСС». 109387, Москва, ул. Летняя, д. 6

тел.: (499) 722-72-30, (495) 647-40-77; e-mail: lanpress@lanbook.ru

в Краснодаре и в Краснодарском крае

«ЛАНЬ-ЮГ». 350901, Краснодар, ул. Жлобы, д. 1/1

тел.: (861) 274-10-35; e-mail: lankrd98@mail.ru

ДЛЯ РОЗНИЧНЫХ ПОКУПАТЕЛЕЙ:

интернет-магазин

Издательство «Лань»: <http://www.lanbook.com>

магазин электронных книг

Global F5: <http://globalf5.com/>

Подписано в печать 06.12.21.

Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 70×100^{1/16}.

Печать офсетная/цифровая. Усл. п. л. 9,75. Тираж 30 экз.

Заказ № 023-22.

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленного оригинал-макета в АО «Т8 Издательские Технологии».
109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.



Ляпков Алексей Алексеевич

Кандидат химических наук
доцент (ТПУ, ИШХБМТ)



Троян Анна Алексеевна

Кандидат химических наук
доцент (ТПУ, отделение
химической инженерии)

В пособии рассматриваются возможности и тенденции развития современных методов 3D печати полимерами. Показаны основные разновидности и особенности полимерных аддитивных технологий. Пособие подготовлено специалистами Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий и Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. Пособие предназначено для магистров направления «Материаловедение и технологии материалов», «Химическая технология», слушателей курсов повышения квалификации, а также будет полезно бакалаврам, магистрам, аспирантам и инженерно-техническим работникам, связанным с получением и переработкой полимерных материалов.