

## СОВРЕМЕННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ

*Ключевые слова: полимерные материалы, 3D-принтер, 3D-печать.*

*Метод послойного создания физического объекта по цифровой 3D-модели находит широкое применение в различных сферах человеческой деятельности: в строительстве, в медицине, в металлургии и др. В качестве материалов для создания физического объекта выступают глиняные смеси, бетон, целлюлоза, металлические порошки и даже шоколад. В статье приводится обзор современных полимерных материалов и технологий 3D-печати.*

*Keywords: polymeric materials, 3D-printer, 3D-printing.*

*The method of creating a physical layering object by digital 3D-model is widely used in various fields of human activity in construction, medicine, industry and etc. As materials for the creation of a physical object protrude clay mixture, concrete, cellulose, metallic powders and even chocolate. The article provides an overview of advanced polymer materials and 3D-printing technology.*

Непрерывное развитие цифровых информационных технологий и оборудования привели к идее послойного создания (выращивания) материальных объектов на основе цифровой 3D-модели и разработке периферийного устройства – 3D-принтера, позволяющего послойно создавать физические объекты по цифровой 3D-модели. В зарубежных источниках данный тип устройств называют фабберами, а процесс трехмерной печати – быстрым прототипированием (Rapid Prototyping). Таким образом, 3D-печать – это метод прототипирования (создания прототипа, модели предмета), позволяющий из математической модели, разработанной в специальной САД-системе, при помощи 3D-принтера получить послойно созданный физический объект [1].

Технологии 3D-печати находят широкое применение:

- во-первых, в промышленном производстве:
  - для быстрого прототипирования. Быстрое изготовление прототипов моделей и объектов для дальнейшей доводки позволяет еще на этапе проектирования вносить корректировки в конструкцию узла или объекта в целом, что способствует существенному снижению затрат в производстве при освоении новой продукции и ускоряет процесс их разработки;
  - в мелкосерийном производстве позволяет быстро производить готовые детали или изделия из материалов, поддерживаемых 3D-принтерами;
  - для изготовления литьевых форм для ряда серийных производств. Например, изготовленная на 3D принтере дорогая и сложная литьевая форма для пластиковых деталей позволяет на ее основе массово, быстро и с незначительными издержками штамповать серийные изделия;
  - для производства сложных, массивных, прочных и недорогих систем, например большая часть деталей беспилотного самолета Polecat[en] компании Lockheed была изготовлена методом скоростной 3D-печати;
  - в пищевом производстве. Известны 3D-принтеры, осуществляющие печать шоколадом;

- во-вторых, при проведении всевозможных проверок и тестов с использованием моделей. Например, в авиационной и автомобильной промышленности используются прототипы деталей аппаратов для изучения различных процессов и явлений, происходящих во время эксплуатации (износостойкости, обтекаемости), а также возможности взаимодействия частей изделий. Для исследования процессов, протекающих внутри механизмов, изготавливаются прототипы из прозрачных материалов. Например, использование прозрачной трансмиссии автомобиля инженерами Porsche позволило изучить процесс прохождения в ней масла;

- в-третьих, в медицине при протезировании и производстве имплантатов (фрагменты скелета, черепа, костей, хрящевые ткани);

- в-четвертых, в строительстве зданий и сооружений.

На данный момент времени существует множество способов 3D-печати, использующих различные материалы, но в основе любого из них лежит принцип послойного создания материального объекта. Для создания слоев применяются следующие технологии:

- лазерная, включающая:
  - лазерную стереолитографию (англ. laser stereolithography, SLA), при которой воссоздаваемый объект формируется из жидкого фотополимера, затвердевающего под действием ультрафиолетового лазерного излучения. По этой технологии фотополимер затвердевает под действием луча лазера. Трехмерный объект выращивается слой за слоем путем погружения подвижной платформы в емкость с материалом, благодаря чему отпадает нужда в использовании поддерживающих материалов. Готовая модель промывается и выдерживается некоторое время под ультрафиолетовой лампой. Жидкий полимер затвердевая превращается в достаточно прочный пластик;
  - облучение через маску (англ. solid ground curing, SGC) – версия SLA. От SLA эта технология отличается способом засветки (излучение

ультрафиолетовых ртутных ламп через фотошаблон, меняющийся с новым слоем). Современные SGC-принтеры используют DLP-матрицы. Разрешение этой технологии уступает SLA и составляет всего 0,1 мм, однако и стоимость таких принтеров заметно ниже;

- PolyJet похожа на струйную печать, но вместо струйной подачи чернил на бумагу 3D-принтеры выпускают струи жидкого фотополимера, который образует слои на модельном лотке. По этой технологии нанесение слоя осуществляется не погружением в ванну, а распылением материала на поверхность. Слой полимера засвечивается ультрафиолетом, после чего процесс повторяется. Для печати по данной технологии необходимо использовать материал поддержки (обычно гелеобразный растворимый в воде полимер). Данная технология позволяет использовать сразу несколько материалов, отличающихся цветом, различными значениями твердости, создавая, таким образом, многокомпонентные модели;

- селективное лазерное спекание (англ. selective laser sintering, SLS, или direct metal laser sintering, DMLS), при которой воссоздаваемый физический объект формируется из плавкого порошкового материала (пластик, металл) путем его плавления под действием лазерного излучения. Обычно температура рабочей камеры поддерживается на уровне немного ниже точки плавления рабочего материала, а для предотвращения окисления процесс проходит в бескислородной среде;

- электронно-лучевая плавка аналогична технологии SLS/DMLS, отличительной особенностью является то, что будущий объект формируется плавлением металлического порошка благодаря электронному лучу в вакууме.

- ламинирование (англ. laminated object manufacturing, LOM), при которой объект воссоздается послойным склеиванием тонких пленок материала с использованием физических процессов нагрева, давления и дальнейшим вырезанием лазерным лучом или режущим инструментом на каждом слое соответствующих контуров сечений будущего изделия. В некоторых случаях удаление излишнего материала вызывает затруднения;

- струйная, использующая:

- застывание материала при охлаждении, при этом раздаточная головка выдавливает на охлаждаемую платформу-основу капли разогретого термопластика, капли, быстро застывая и слипаясь друг с другом, формируют слои будущего объекта;

- полимеризацию фотополимерного пластика под действием ультрафиолетовой лампы. Данный способ похож на предыдущий, но отверждение пластика происходит под действием ультрафиолета;

- склеивание или спекание порошкообразного материала, которое похоже на лазерное спекание. Отличие заключается в том, что порошковая основа (в большинстве случаев измельченная бумага или целлюлоза) склеивается

жидким веществом, поступающим из струйной головки. При этом возможно окрашивание воспроизводимого объекта с использованием веществ различных цветов;

- наплавление (FDM), при котором будущий объект формируется послойной укладкой расплавленной нити из плавкого материала, например пластика, металла, воска [2, 3, 4].

Для 3D-печати крупных архитектурных моделей в качестве самоотверждаемого материала используются густые керамические смеси.

В отдельную группу можно выделить технологии, использующие биопринтеры, которые позволяют осуществлять «печать» 3D-структуры органа для пересадки стволовыми клетками, дальнейшее деление, рост и модификации клеток обеспечивают окончательное формирование «выращиваемого» органа. Разработки университета Миссури позволяют наносить на специальный био-гель сгустки клеток заданного типа.

Различают следующие варианты позиционирования печатающей головки в 3D-принтерах: декартова (в конструкции используются три взаимно-перпендикулярные направляющие, вдоль каждой из которых двигается либо печатающая головка, либо основание модели), автономная (печатающая головка размещена на собственном шасси, конструкция передвигается целиком за счет какого-либо движителя, приводящего шасси в движение), ручная (печатающая головка выполнена в виде ручки/карандаша). Пользователь при использовании ручки самостоятельно подносит ее в то место пространства, куда считает нужным добавить выделяемый из наконечника быстро затвердевающий материал.

Данный прибор называют «3D-ручка». К 3D-принтерам его относят условно. Известны варианты с использованием термополимера, застывающего при охлаждении, и с использованием фотополимера, отверждаемого ультрафиолетовым излучением.

3D-модели, как правило, создаются в САПР, поддерживающих управление 3D-печатью. Для печати используют формат файла STL. Практически все принтеры имеют свой собственный софт для управления печатью: часть – коммерческие, часть с открытым исходным кодом.

Один из лучших расходных материалов для 3D-печати – АБС-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол), отличающийся отсутствием запаха, нетоксичностью, ударопрочностью и эластичностью. Температура плавления от 240°C до 248°C. Выпускается в виде порошка или тонких пластиковых нитей, намотанных на бобины. Воспроизводимые объекты из АБС-пластика долговечны. Однако, данный материал позволяет изготавливать непрозрачные объекты и, кроме того, изделия из них не переносят прямых солнечных лучей.

Для создания прозрачных моделей в 3D-печати применяется акрил. Акрил имеет более высокую температуру плавления, чем АБС-пластик, очень быстро остывает и твердеет. Возможны

визуальные искажения готового изделия из-за образования множество мелких воздушных пузырьков в процессе 3D-печати.

Другим часто используемым материалом для 3D-печати является нейлон, который имеет более высокую температуру плавления, около 320°C, в отличие от АБС-пластика, высокую способность впитывания влаги, более продолжительный период застывания. Печать нейлоном схожа с печатью АБС-пластиком, однако имеет ряд особенностей: требует откачки воздуха из экструдера из-за токсичности компонентов нейлона, экструдер оснащается шипами из-за скользкости нейлона. Несмотря на выше обозначенные недостатки 3D-печать нейлоном широко применяется в виду того, что воссоздаваемые объекты, выращенные из данного материала, не такие жесткие, как из АБС-пластика, и для них можно использовать шарниры скольжения.

Поликапролактон (известный так же, как полиморф и протопласт) – один из самых используемых рабочих материалов для быстрого прототипирования в силу своей низкой температуры плавления (около 60°C) и довольно высокой прочности. Он по свойствам близок к биоразлагаемым полиэфирам. Он имеет низкую температуру плавления, быстро затвердевает, обеспечивает прекрасные механические свойства готовых изделий. Поликапролактон абсолютно безопасен, а также способен быстро разлагаться на безвредные компоненты, легко разлагается в человеческом организме (капсулы для лекарств в прощковой форме из поликапролактона).

Полифенилсульфон – аморфный термопластик с хорошими тепловыми, механическими и диэлектрическими свойствами. Он напоминает обычное стекло, но превосходит его по прочности, характеризуется теплостойкостью (плавится при температурах 340-370°C), высокой твердостью, практически не горит. Изначально данный материал широко использовался для изготовления теплостойких деталей для военных самолетов. В настоящее время помимо авиационной и аэрокосмической промышленности используется при изготовлении медицинских инструментов, вследствие его устойчивости к обработке паром. Полифенилсульфон выдерживает кратковременный нагрев до температуры 220°C, температура изгиба под нагрузкой составляет 190°C, температура стеклования – 220-230°C, обладает хорошей химической стойкостью, в том числе устойчивостью к растворителям, кислотам и щелочам, высокой ударопрочностью, физиологической инертностью, что позволяет его использовать для изготовления посуды, хорошими диэлектрическими свойствами. Однако, высокая прочность материала затрудняет его полировку после печати, а при механической обработке возникает риск растрескивания материала. При воздействии на материал открытого пламени приводит выделение вредных веществ. Совместимые технологии 3D-печати данным материалом FDM и SLS. Ввиду высокой температуры плавления, печать

полифенилсульфоном возможна только на профессиональных 3D-принтерах [5].

Полиэтилен низкого давления – самый распространенный вид термопластов. Из данного материала изготавливают пленки, пакеты, бутылки, канистры, трубы и т.п. В отличие от всех других рабочих материалов, используемых для 3D-печати, полиэтилен низкого давления является лидером, т.к. может быть использован в любой технологии 3D-печати.

Полипропилен – самый легкий из всех известных на сегодня термопластичных полимеров. В сравнении с полиэтиленом низкого давления хуже плавится, но лучше противостоит истиранию. Он уязвим к активному кислороду и деформируется при отрицательных температурах.

Отдельный класс светочувствительных смол – фотополимерные смолы. Они способны менять свое агрегатное состояние под воздействием лазерного луча или ультрафиолетовой вспышки. Материал идеален для изготовления мастер-моделей для последующих отливок и создания ювелирных изделий, т.к. в некоторых принтерах толщина слоя может достигать до 0,025 мм (высокое разрешение печати). Поверхность готовых изделий из фотополимерной смолы не требует дополнительной обработки, требуется только в конце печати удалить остатки смолы. Фотополимерные смолы имеют широкий диапазон механических и физических свойств, позволяют получать как гибкие, так и твердые, как прозрачные, так и светонепроницаемые готовые модели. Фотополимерные смолы позволяют осуществлять 3D-печать многокомпонентных деталей. Недостатками данных материалов является их дороговизна, сложность печати, большой размер принтеров. 3D-печать фотополимерными смолами может осуществляться с использованием технологий SLA, SGC, PolyJet [6].

ПВА-пластик (поливинилацетат) – растворимый в воде полимер белого цвета. Используется для 3D-печати либо в виде гранул, либо нити (диаметров 1,75 и 3 мм). Основными преимуществами ПВА являются растворимость в воде, возможность комбинирования с другими видами пластика. Ввиду высокой гигроскопичности и низкой прочности, данный материал в 3D-печати используют в качестве разделителя при печати составных деталей. В качестве примера можно привести печать болта с накрученной гайкой: ПВА выступает в роли прокладки, которая после помещения детали в воду растворяется, позволяя открутить гайку. Время полного растворения пластика составляет 24 часа. Возможные технологии 3D-печати – SLS, FDM, биопечать. Данный материал легко можно использовать в обычных домашних FDM-принтерах, оснащенных двумя печатающими головками [7].

Поликарбонат – термопластичный полимер, сохраняющий свои физические свойства в условиях экстремально высоких и экстремально низких температур, обладающий высокими показателями светонепроницаемости, прочности и прозрачности, имеет высокую температуру плавления. Сохраняет

свои свойства в широком диапазоне температур: от – 40 до 120°С. Средняя температура печати составляет 260-280°С, однако существует зависимость со скоростью печати. Применяется для печати сверхпрочных моделей. Другим преимуществами поликарбоната являются биологическая безопасность, огнеупорность, устойчивость к кислотам. Однако, у поликарбоната под воздействием ультрафиолета может снижаться ударопрочность, контакт поликарбоната с бензином или маслом может привести к его растрескиванию. Достоинством данного материала для 3D-печати является то, что он поддается экструзионной обработке. Поликарбонат совместим с АБС- и ПЛА-пластиками и позволяет создавать модели из комбинированных материалов. В отличие от ПЛА-пластика, который совершает фазовый переход очень быстро, поликарбонат размягчается очень медленно, что позволяет использовать его при переходе с пластика с более низкой температурой экструзии. Такая особенность позволяет начать экструзию поликарбоната даже при температуре предыдущего материала. Главным недостатком поликарбоната для 3D-печати является его высокая гигроскопичность, потому не всегда используется в 3D-принтерах. Высокая гигроскопичность поликарбоната создает некоторые проблемы при печати. «Сырой» поликарбонат после экструзии теряет свою прозрачность и становится белесоматовым, в структуре пластика также могут наблюдаться пузырьки, а его поверхность становится шершавой. Поликарбонат для 3D-печати используется в виде нити (диаметров 1,75 и 3 мм). Используемые технологии 3D-печати для поликарбоната FDM, LOM, SLS. Для печати поликарбонатом используются те же самые экструдеры, что при работе с АБС- и ПЛА-пластиками [8].

Бурное развитие 3D-печати привело к не менее бурному развитию расходных (рабочих) материалов для печати, большей частью пластмасс. Данное обстоятельство связано с тем, что именно пластмассы оказались наиболее пригодными для технологий FDM (моделирования методом наплавления) и SLS (селективного лазерного спекания). Как показывает обзор, наиболее востребованными видами пластмасс для 3D-печати являются АБС- и ПЛА-пластики. АБС-пластик наряду с достаточно хорошими эксплуатационными

характеристиками (ударопрочен, эластичен, влагостоек, нетоксичен, устойчив к влиянию щелочей, масел и моющих средств, и может выдерживать нагрев до 100°С) и технологическими (подвергается вторичной переработке) имеет самую низкую стоимость. Так, АБС-пластик стоит примерно в два раза дешевле своего главного конкурента – ПЛА-пластика. ПЛА-пластик относится к категории биоразлагаемых пластмасс, поскольку основными ресурсами для его производства являются кукуруза и сахарный тростник. Нетоксичность полилактида является главным преимуществом данного материала. В качестве основных недостатков данного материала можно отметить его недолговечность и дороговизну. По сравнению с АБС-пластиком, он имеет более низкую температуру плавления (порядка 190°С), соответственно процесс печати с его использованием менее энергозатратен.

Как видно из обзора, список полимерных материалов, используемых для 3D-печати, довольно обширен, который он постепенно пополняется новыми материалами, которые, как в случае с ПВА-пластиком и поликапролактоном, могут заметно расширить область применения технологий 3D-печати.

## Литература

1. Трехмерная печать [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://3dpr.ru/trehmernaya-pechat>, свободный.
2. *Слюсар, В.И.* Фаббер-технологии: сам себе конструктор и фабрикант / В.И.Слюсар // Конструктор. – 2002. - № 1. – С. 5 - 7.
3. *Слюсар, В.И.* Фаббер-технологии. Новое средство трехмерного моделирования / В.И.Слюсар // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2003. - № 5. – С. 54 - 60.
4. *Слюсар, В.И.* Фабрика в каждый дом / В.И.Слюсар // Вокруг света. – № 1 (2808). - Январь, 2008. – С. 96 - 102.
5. Полифенилсульфон [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://3dpr.ru/polifenilsulfon-ppsu>, свободный.
6. Фотополимерные смолы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://3dpr.ru/fotopolimernye-smoly>, свободный.
7. PVA-пластик [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://3dpr.ru/pva-plastik-polyvinyl-alcohol>, свободный.
8. Поликарбонат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://3dpr.ru/polikarbonat-pc>, свободный.

---

© **Р. В. Коваленко** – старший преподаватель кафедры «Дизайн» КНИТУ, [telegramm@mail.ru](mailto:telegramm@mail.ru).

© **R. V. Kovalenko** – senior lecturer of the Design Department of Kazan National Research Technological University, [telegramm@mail.ru](mailto:telegramm@mail.ru).