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

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

Производственный цикл начинается с обработки трехмерной цифровой модели. Модель в формате STL делится на слои и ориентируется наиболее подходящим образом для печати. При необходимости генерируются поддерживающие структуры, необходимые для печати нависающих элементов. Некоторые устройства позволяют использовать разные материалы во время одного производственного цикла. Например, возможна печать модели из одного материала с печатью опор из другого, легкорастворимого материала, что позволяет с легкостью удалять поддерживающие структуры после завершения процесса печати. Альтернативно, возможна печать разными цветами одного и того же вида пластика при создании единой модели.

Изделие, или «модель», производится выдавливанием («экструзией») и нанесением микрокапель расплавленного термопластика с формированием последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования.

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

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

Технология печати методом послойного наплавления (FDM) была разработана С. Скоттом Трампом в конце 1980-х и представлена на рынке компанией Stratasys, начиная с 1990. На данный момент технология получает все большее распространение среди энтузиастов, создающих принтеры с открытым исходным кодом, а также коммерческих компаний, ввиду истечения срока действия оригинального патента. В свою очередь, широкое распространение технологии привело к существенному снижению цен на 3D-принтеры, использующие данный метод производства.

Технология FFF имеет массу преимуществ, среди которых относительная простота конструкции принтеров и ценовая доступность как устройств, так и расходных материалов. Причем, ассортимент материалов является, пожалуй, самым широким среди всех доступных технологий. Как правило, для печати используются термопластики, но есть и исключения – композитные материалы, содержащие различные добавки, но основанные, опять-таки, на термопластиках. В этом разделе мы постараемся рассказать о наиболее широко применяемых материалах поподробнее, начиная с наиболее популярных видов.

Полилактид (PLA, ПЛА)

Акрилонитрилбутадиенстирол (ABS, АБС)

Поливиниловый спирт (PVA, ПВА)

Нейлон (Nylon)

Поликарбонат (PC, ПК)

Полиэтилен высокой плотности (HDPE, ПНД)

Полипропилен (PP, ПП)

Поликапролактон (PCL)

Полифенилсульфон (PPSU)

Полиметилметакрилат (Acrylic, оргстекло, акрил, ПММА)

Полиэтилентерефталат (PET, ПЭТ)

Ударопрочный полистирол (HIPS)

Древесные имитаторы (LAYWOO-D3, BambooFill)

Имитаторы песчаника (Laybrick)

Имитаторы металлов (BronzeFill)

Плюсы и минусы

Среди объективных достоинств FDM-печати следует упомянуть в первую очередь следующие:

Доступная стоимость. В 2020 году вполне реалистично приобрести принтер по цене менее $500, который за 2 часа распечатает качественное и готовое к использованию изделие.

Филаменты также продаются по разумной стоимости, а их ассортимент чрезвычайно разнообразен. Филаменты отличаются по своей расцветке, гибкости, прочности, устойчивости к механическим воздействиям и влиянию УФ-лучей, экологичности, растворимости в воде и многим другим параметрам. Для вас не составит труда подобрать оптимальную разновидность для печати конкретного объекта.

Запчасти для принтеров легко найти в продаже. FDM-сообщество руководствуется принципом открытого кода. Вам всегда помогут найти нужный предмет, субстанцию или информацию.

Чистота и безопасность для здоровья. Процесс FDM-печати не токсичен. Да, в воздух попадают мельчайшие частицы расплавленного пластика — но их концентрация не представляет опасности для человека. Наиболее активно такие частицы выделяются при работе с ABS-филаментом, а менее активно — при работе с PLA. Кроме того, в процессе FDM-печати сведен к нулю риск получить травму. Единственный способ навредить себе в случае неосторожного обращения с принтером в процессе работы — это получить ожог.

Однако и недостатки у этой технологии тоже имеются:

Точность печати далека от идеала. FDM-технология допускает погрешность в 0,1 мм, что не всегда допустимо для стоматологии или авиакосмической промышленности. Вызывают эту погрешность незначительные отклонения двигателей, ремней или печатной поверхности, исправить которые на сегодняшний день невозможно.

Скорость печати чрезвычайно медленная по сравнению с традиционным процессом литья. При литье оборудование брызжет жидким материалом в форму, и он застывает. Принтер же тщательно прорисовывает слой за слоем, контролируя каждую точку толщиной 0,4 мм. Принтеру требуется около 20 минут на производство одного брелка для ключей. Способом литья за это же время можно изготовить несколько десятков брелков.

Высокое энергопотребление. Этот недостаток непосредственно вытекает из низкой скорости печати: все то время, пока принтер прорабатывает слой за слоем, ему требуется питание от розетки.

Если с принтером случается неполадка, неспециалист вряд ли сможет определить причину и устранить ее. Чтобы понять, что именно пошло не так, надо досконально разбираться в устройстве FDM-принтера.

Изделия, изготовленные по FDM-технологии, получаются очень хрупкими. Самыми их уязвимыми участками являются линии между слоями. Представьте, что хрупкое изделие из древесины скрестили с хрупким изделием из пластика — таков примерный уровень прочности у FDM-продукции. С помощью традиционных способов производства можно создавать гораздо более прочные и долговечные изделия.

Предметы, распечатанные на FDM-принтере, сегодня почти не поддаются вторичной переработке. Теоретически, переработать их можно. Но современная система утилизации вторсырья ориентируется на маркировку, в соответствии с которой пластиковые изделия сортируют. На одном и том же принтере можно распечатать изделия, которые будут требовать разной маркировки. Если же попробовать переработать их обратно в филамент, мы столкнемся с ограничением: перерабатывать пластик для FDM-печати можно строго определенное количество раз, и это количество зависит от индивидуальных характеристик каждого филамента. В целом процесс утилизации для FDM-технологии пока что слишком сложный и затратный.

Фото готовых изделий по технологии FDM

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

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

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

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

Подобная технология печати дает высокую точность производства. Исходный материал легко обрабатывать и корректировать. При желании пользователь может придать изделию зеркальный блеск.

Поскольку исходный материал в процессе создания застывает всего лишь на 20 и менее процентов от необходимого значения полного высыхания, такой принцип печати позволяет значительно сократить время на изготовление предмета. Вместе с этим степени застывания достаточно, чтобы извлечь модель из принтера без ущерба для внешнего вида. Дальнейшее полное застывание происходит в течение 15–20 минут при обработке инициирующим светом.

Термин «стереолитография» был придуман в 1986 Чарльзом В. Халлом, запатентовавшим метод и аппарат для производства твердых физических объектов за счет последовательного наслоения фотополимерного материала. Патент Халла описывал применение ультрафиолетового лазера, проецируемого на поверхность емкости, заполненной жидким фотополимером. Облучение лазером ведет к затвердеванию материала в точках соприкосновения с лучом, что позволяет вычерчивать контуры заданной модели слой за слоем. В 1986 году Халл основал собственную компанию, 3D Systems, для коммерческого продвижения новой технологии. На сегодняшний день 3D Systems является одним из мировых лидеров среди компаний-разработчиков и поставщиков технологий аддитивного производства.

Исходными материалами для технологии лазерной стереолитографии являются жидкие фотополимерные композиты на акрилатной или эпоксидной основе.

Основное преимущество такого способа изготовления 3D-моделей перед другими вариантами заключается в скорости работы. Для воспроизведения предмета не требуются промежуточные этапы обработки и оснастка. Это позволяет получить готовое изделие всего за несколько часов. В научных исследованиях подобный подход незаменим, поскольку позволяет быстро проводить тестирование экспериментальных образцов.

Второе главное преимущество данного принципа – высокая точность печати. Технология SLA дает возможность наносить слой фотополимера всего в 10 микрон. Это величина, которая в несколько раз меньше толщины человеческого волоса. Поэтому стереолитография пользуется высоким спросом в области изготовления ювелирных изделий и стоматологических протезов.

Теперь остановимся на других достоинствах этого способа печати:

постобработка проста, она не требует сложных технологий, действий или длительного времени;

оборудование не шумит в процессе работы;

можно строить сложные модели с ювелирной структурой, к примеру тонкостенные изделия;

предметы, произведенные по данной технологии, обладают высокой прочностью и большой точностью;

поверхность изделия получается идеальной;

материал расходуется экономно, производство получается безотходным;

созданный предмет за счет использованных фотополимеров можно использовать как готовое изделие.

Дополнительное преимущество SLA перед конкурентами состоит в том, что для печати можно использовать большие рабочие камеры, то есть производить крупногабаритные предметы. Некоторые камеры в 3D-принтерах, применяющих эту технологию, достигают в высоту 2,4 метра.

К недостаткам этого принципа печати можно отнести высокую стоимость производства, поскольку материалы для работы зачастую имеют высокий ценник. Стоимость литра фотополимера может колебаться в пределах 80–120 долларов США, в то время как сами агрегаты для печати стоят в пределах 10–500 тысяч долларов США.

Фото готовых изделий по технологии лазерной стереолитографии

Технология 3D печати PolyJet представляет собой мощный аддитивный метод производства, запатентованный компанией Stratasys. 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 варьируются от мягкой до твёрдой, от прозрачной до совершенно непроницаемой. А благодаря уникальной технологии Objet Connex несколько материалов могут использоваться в слое одновременно на одном и том же участке.

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 ультрафиолетовой лампы. Слои наслаиваются один на другой, и, в результате, получается объёмная модель или прототип. Затвердевшую модель можно брать в руки и пользоваться ей сразу, не прибегая к дополнительной обработке. Помимо определённых материалов для моделирования, 3D принтер использует гелеобразный опорный материал, разработанный специально для укрепления длинных выступов и элементов сложной геометрической формы. Он легко удаляется с помощью руки 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 Objet Connex от Stratasys, основанные на технологии PolyJet, являются единственными системами аддитивного моделирования, которые позволяют использовать в 3D печати различные материалы для производства одной 3D модели в ходе единого рабочего цикла.

На 3D-принтерах PolyJet можно работать различными материалами, которые отличаются по цвету и текстуре: от прозрачных до цветных, и от твердых до мягких. В некоторых моделях принтеров для печати можно использовать несколько базовых материалов и с их помощью создавать новые.

Примеры используемых материалов

Vero – материал подходит для 3D-печати прототипов с высокой детализацией и низкой шероховатостью поверхности. Есть несколько цветов на выбор: черный, циан, синий, маджента, желтый и белый. С их помощью можно создать десятки цветовых оттенков.

VeroDent (MED610) – материал для создания деталей, которые будут длительное время контактировать с кожей или со слизистой оболочкой человека. Часто используется в стоматологии.

Tango – материал для создания эластичных резиноподобных моделей. Например, подошв.

RGD720 – материал, похожий на прозрачный пластик. Подходит для проверки и визуализации форм, медицинских инструментов, наушников.

Durus – ударостойкий и прочный материал.

Плюсы и минусы технологии PolyJet

Плюсы

Качество и точность. Модели, созданные по технологии PolyJet, получаются гладкими и с высокой детализацией. Для объектов до 50 мм точность построения варьируется от 0,02 до 0,085 мм. Для более крупных объектов от 0,1 до 0,2 мм.

Скорость. По заявлению Stratasys PolyJet – это их самая быстрая технология. В отличие от FDM или SLS, при одновременной печати нескольких деталей, скорость остается такой же, как и при печати одной.

Разнообразие материалов. Большой выбор материалов позволяет получать образцы с различными физическими и оптическими свойствами.

Интеграция и сложность моделей. Технология позволяет печатать объекты из разных материалов встроенные в структуру друг-друга и модели с геометрией сложной формы, включая полости любой конфигурации.

Минусы

Стоимость. Поскольку технология PolyJet ориентирована в основном на профессиональное применение, где важное значение имеют минимизация погрешности и высокое качество, за это приходится платить: PolyJet-принтеры это промышленной оборудование с соответствующей ценой, и совместимы они только с оригинальными фотополимерами.

Фото готовых изделий по технологии PolyJet

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

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

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

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

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

История изобретения прямого лазерного спекание металлов

Вообще, историю появления прямого лазерного спекания металла можно начать с появления идеи этого процесса, тогда он носил название «Метод для производственных статей любой геометрии из порошкообразного материала». Работу именно с таким названием запатентовал француз Пьер Сиро (Pierre Ciraud) в 1971 году. Еще через шесть лет в 1977 году Росс Хоушолдер (Ross Housholder) усовершенствовал этот метод.

В 80-х идея начала стремительно развиваться: Карл Декард, Майкл Фейджин и Франк Арселла вдохнули жизнь в технологию. Уже в 1987 году начинается первое коммерческое использование машины, собранной ранее упомянутым студентом Техасского университета в Остине (The University of Texas at Austin) Декардом и профессором того же заведения Биманом.

В том же году ими создается компания Nova Automation. В 1989 году были напечатаны первые детали из металла. Первое время эта компания была одной из трех крупнейших по производству 3D-принтеров. Но в 2001 году она была куплена корпорацией 3D-Systems (США) и на рынке осталось только два гиганта, второй – компания EOS (США).

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

Преимущества:

Практически безотходное производство. Весь порошок, который не был использован в печати может быть использован повторно;

Возможность создания изделий любой сложности. Прямое лазерное спекание металлов практически не ограничивает вас в геометрической форме воспроизводимых изделий;

Возможность 3Д печати нескольких изделий одновременно. Все зависит от габаритов 3Д модели и размеров камеры для порошка. С таким прибором вы легком можете наладить мелкосерийное производство металлических изделий;

Высокая скорость создания физических объектов. Буквально за пару часов вы получите полностью готовый функциональный объект, что гораздо быстрее процесса литья под давлением.

Из недостатков стоит отметить тот факт, что прямое лазерное спекание металлов – все же технология послойного воспроизведения объектов. Несмотря на всю прочность готовых изделий, они не являются монолитными и не могут составить полную конкуренцию литым деталям. Однако технология стремительно совершенствуется и есть шанс что в будущем этот недостаток будет устранен.

Фото готовых изделий по технологии прямого лазерного спекания

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

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.

Процесс печати протекает следующим образом:

Лист материала с клейким покрытием наносится на рабочую платформу (или нижние слои модели) с помощью разогретого ролика. Контур слоя вычерчивается с помощью лазера. Лишний материал режется лазером на мелкие секции для упрощения процедуры удаления. Платформа с готовым слоем передвигается вниз. В рабочую камеру подается новый лист материала. Платформа поднимается вверх до контакта с новым материалом. Цикл повторяется до завершения постройки модели, после чего лишний материал удаляется, и производится завершающая механическая обработка изделия (сверление, шлифовка и пр.)

Технология LOM имеет некоторые особенности:

разрешение по оси Z зависит от вида используемого материала, и не может быть выше чем определяемая толщиной слоя, а общая точность печати намного уступает технологии SLA или технологиям лазерного спекания (DMLS, SLS, DMD, SLM и т.д);

бумага хорошо впитывает влагу, поэтому для защиты и сохранения технических и геометрических характеристик получаемые изделия покрывают лаком или специальными красками;

изделия напечатанные из бумаги имеют характеристики схожие с характеристиками изделий из дерева, и могут обрабатываться так же;

невысокая стоимость получаемых изделий за счет доступности и низкой цены используемых материалов.

Технология LOM на сегодняшний день является одной из из самых быстрых и самых доступных технологий создания 3D прототипов.

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

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

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

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

Преимущества:

Невысокая стоимость производства. Хотя 3D печать из бумаги и не является самой дешевой методикой, себестоимость воспроизведения изделий с ее помощью гораздо ниже, чем у других профессиональных методик (SLS, SLM и т.д.). Также в этом играет роль и цена оборудования;

Применение распространенных расходных материалов. Согласитесь, металлическая фольга или бумага А4 найдутся дома у большинства из нас. Даже пластик и фотополимерная смола для бюджетных методик FDM и SLA обойдутся дороже;

Возможность создания полноцветных изделий. Некоторые LOM 3D принтеры ориентированы на изготовления объектов в заданных цветах, что позволит ускорить и упростить их постобработку.

Недостатки:

Точность печати ниже чем, у других промышленных методик. Увы, по качеству получаемых изделий 3D печать из бумаги слегка уступает другим технологиям. Средняя высота слоя, предлагаемая принтерами LOM, составляет 300 микрон;

Опасность расслоения. Очевидно, что высокой прочностью получаемые модели похвастаться не могут, но при отсутствии должного ухода (а иногда и без видимых причин), изделия расходятся по сечению слоев;

Бумага хорошо впитывает влагу. Для защиты напечатанных моделей рекомендуется покрывать их лаком или специальными красками. Это продлит жизнь изделиям и поможет избежать расслоений.

Фото готовых изделий по LOM-технологии

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

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

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

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

Технология позволяет добиваться исключительно высоких показателей точности, сравнимых с лазерной стереолитографией (SLA) – минимальная толщина наносимого слоя может составлять 16 микрон, а разрешение печати в горизонтальной плоскости достигает 750х750х1600 DPI.

При печати в MJM-принтере часто используется медицинский пластик, на основе которого создаются качественные имплантаты. Кстати, в ранних моделях устройств чаще всего применялись обычные термопластики, но благодаря совершенствованию материалов термопластики постепенно заменились воском и фотополимерами. В принтерах ProJet применяются материалы марки VisiJet, которые отличаются различными механическими свойствами. Например, VisiJet DentCast используется в стоматологии при создании коронок, челюстных моделей, протезов, VisiJet X применяется при проектировании сложных технических деталей, а VisiJet Crystal – эластичный и прочный материал, который нужен при создании дизайн-моделей.

Плюсы технологии MJM

Модели получаются высокой или сверхвысокой четкости в зависимости от режима, в котором работает 3D-принтер.

Высокое качество детализации, которая отличается выращиваемый объект на выходе.

Построение модели выполняется точно и прочно (учитывается прочность на разрыв).

Полное соответствие детали заданным параметрам.

Наружная поверхность моделей гладкая, а потому простая в обработке.

Единственный недостаток — на 3D-принтер цена довольно высока, а дешевые модели подойдут лишь для непрофессионального использования.

Фото готовых изделий по технологии многоструйного моделирования

SLS (Selective Laser Sintering, селективное лазерное спекание) — технология аддитивного производства, основанная на послойном спекании частиц полимерного порошка с помощью лазерного излучения. Технология достаточно опасна (мы расскажем об этом подробнее), но освоившим открывается широчайший горизонт возможностей. Основное преимущество SLS — обеспечение прекрасных механических свойств готовых изделий. Изделия получаются чрезвычайно прочными, с высокой детализацией и качеством построения поверхностей. Другой весомый плюс — SLS-печать практически безотходна, поскольку неиспользованный для выращивания деталей порошок частично смешивается с новыми порциями материала и возвращается в работу (этот процесс носит название «регенерация»), а частично — отправляется на переработку.

Основной принцип работы SLS 3D-принтера заключается в спекании полимерного порошка лазерным лучом. Предварительно нагретый порошок кратковременно облучается лазером и спекается с уже затвердевшими частицами, которые находятся в нижележащем слое. Управляя параметрами этого процесса можно добиваться нужной остаточной пористости и плотности полученной детали. При этом компания-производитель (мы будем рассматривать продукты немецкой компании EOS GmbH) предоставляет владельцам SLS-машин оригинальные наборы параметров, идеально подобранные под используемые материалы и прошедшие тщательную оптимизацию. Для производства деталей с разными свойствами компания предоставляет специальные наборы параметров (Part Property Profile или PPP), которые гарантируют, что напечатанные с их применением детали будут иметь одинаковые характеристики независимо от того, на какой машине их вырастили. Все наборы PPP-параметров имеют номера версий, поскольку EOS ведет их непрерывную оптимизацию.

SLS-технология отличается низкой скоростью введения тепловой энергии. Чаще всего применяется непрерывный режим генерации луча, время действия импульсов сокращается до микросекунд. Формирование нового слоя представляет преобразование материала из жидкой фазы при высокой температуре воздействия.

Изготовленные на SLS-принтере трехмерные модели обладают практически изотропными механическими свойствами. Готовые изделия отличаются повышенной упругостью и прочностью на растяжение.

Свое развитие, как и другие подобные методы, технология начала в 70-х годах прошлого века. Так, в 1971 году француз Пьер Сиро (Pierre Ciraud) подал заявку на патент, описывающая способ изготовления изделий из порошкового материала, основанный на отверждении и скреплении порошка под воздействием сфокусированного луча энергии. Представленная технология имеет малое отношение к любой из сегодняшних коммерческих аддитивных технологий, но она стала предшественником более поздних разработок технологии лазерной обработки материалов.

А в 1979 году, изобретатель по имени Росс Хоушолдер (Ross F. Housholder) подал заявку на патент, с описанием системы и метода создания трехмерного изделия слой за слоем, имеющего сходство с будущими технологиями лазерного спекания. Но из-за чрезвычайно высокой стоимости лазеров в то время, Хоушолдер смог только частично протестировать свой метод.

Коммерчески успешная технологии селективного лазерного спекания была разработана и запатентована студентом Техасского Университета в Остине Карлом Декардом (Carl Deckard) и его научным руководителем, профессором машиностроения Джо Биманом (Joe Beaman) в середине 1980-х годов при поддержке агентства DARPA (агентство передовых оборонных исследовательских проектов) и агентства NSF (независимое агентство при правительстве США, отвечающее за развитие науки и технологий).

В список доступных для SLS материалов входят специальные однокомпонентные порошки (например, TPE-порошок), термопласты либо порошковые смеси, скомпонованные из различных составляющих, например:

полимеры: нейлон, полиамид, полистирол;

сплавы и металлы: сплавы хрома, кобальта, титан, сталь и даже драгоценные металлы;

керамика;

стекло;

стекловолокно;

углеродные волокна;

композитные материалы;

песчаные смеси и пр.

Ключевые преимущества и недостатки технологии приведены ниже:

Детали SLS обладают хорошими, изотропными механическими свойствами, что делает их идеальным вариантом для функциональных деталей и прототипов.

SLS не требует поддержки, поэтому детали со сложной геометрией легко напечатать.

Производственные возможности SLS превосходны для мелкого и среднего серийного производства.

В настоящее время широко доступны только промышленные системы SLS, поэтому время выполнения заказа больше, чем у других технологий 3D-печати, таких как FDM и SLA.

Детали SLS имеют зернистую поверхность и внутреннюю пористость, которые могут потребовать последующей обработки, если требуется гладкая поверхность или водонепроницаемость.

SLS не может точно печатать большие плоские поверхности и маленькие отверстия, так как они подвержены деформации и перекосу.

Фото готовых изделий по технологии селективного лазерного спекания

3DP расшифровывается как Three-Dimensional Printing, и переводиться 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.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.

Сегодня специалисты насчитывают более тридцати технологий 3D-печати, которые в том или ином аспекте дублируют друг друга, хотя каждая имеет свои особенности. 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.

Если рассмотреть ее подробнее, то печать происходит следующим способом:

Камера построения 3D-принтера состоит из двух частей: в первой находится материал, из которого будет «выращваться» модель, во второй – происходит сам процесс, а именно:

Для начала в компьютер, подсоединенный посредством Ethernet–кабеля к принтеру, загружается CAD-модель, которая «нарезается» на слои, толщиной около 0,1 мм. Далее, на специальную платформу роликом наносится слой тонкий слой порошкообразного материала (гипс, полимеры, песок, металл). С помощью печатающей головки происходит распыление связующего вещества (клей, вода, специальная смесь) по координатам границ первого слоя, полученным с компьютера.

После этого платформа с моделью опускается на толщину слоя вниз, а камера со строительным веществом на такое же расстояние вверх. Далее, ролик раскатывает следующий слой и процесс повторяется. После окончания 3D-печати изделие извлекают из слоя порошка и тщательно очищают от его остатков.

При изготовлении моделей из металлического порошка добавляется процесс обжига в специальной печи.

Впервые идею реализации оборудования, использующего эту схему печати, предложили два студента Массачусетского технологического института Тим Андерсон и Джим Бредт в 1993 году. Именно благодаря им термин 3D-печать распространился по всему миру. И это вполне справедливо, ведь первая модель устройства представляла собой модификацию обычного 2D-принтера. Он использовал вместо чернил специальный клеящий состав, который слой за слоем наносил на поверхность связываемого вещества границы будущего трехмерного изделия.

В 1995 году Тим и Джим организовали фирму Z Corporation, которая и вывела на рынок данную технологию, усовершенствовав ее до такой степени, что в 2012 году ее пожелала вместе с фирмой приобрести корпорация 3D systems. Под ее брендом бывшие модели Z Corporation сегодня продаются по всему миру.

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 Бедтом, они наладили выпуск линейки принтеров, которые сегодня печатают даже металлические изделия.

Как и в SLS, основой для будущего объекта является порошок (гипсовый композит), только он не спекается, а послойно склеивается введением связующего вещества. Однако технологии шагнули вперед и как ясно из предыдущего раздела 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.

Недостатки

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.

Преимущества

Высокая скорость построения деталей – около 6 мм по высоте в час, при размере рабочей зоны 780 х 400 мм это составит 1780 см куб., что на порядок превосходи лазерные технологии быстрого прототипирования.

Сравнительно небольшая стоимость расходных материалов.

Фото готовых изделий по технологии 3DP

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

Концепция EBF3 основана на постройке «практически готовых форм» («Near-net-shape» в англоязычной терминологии). Это означает, что изделия создаются на основе трехмерных цифровых моделей с настолько высокой точностью, что механическая обработка и доводка изделий практически не требуется. Современные производственные методы с использованием программного управления основываются на обработке трехмерной цифровой модели для создания алгоритмов, используемых в машинной обработке (т.н. G-code). Алгоритмы служат для определения траектории движения режущих инструментов в процессе создания готового изделия из болванки. В случае с EBFȝ процесс имеет прямо противоположное направление: те же самые цифровые модели используются для выработки производственных алгоритмов, регулирующих не удаление лишней массы, а нанесение необходимого материала. Технология использует электронные излучатели высокой мощности в вакуумной камере для плавки металла. Электронный пучок передвигается по рабочей поверхности, повторяя контуры цифровой модели, в то время как металлическая проволока постепенно подается в точку фокусирования пучка. Расплавленный материал немедленно застывает, формируя прочные слои заданной модели. Процесс повторяется до построения цельной модели, требующей лишь минимальной обработки внешней поверхности. Технология EBFȝ позволяет создавать объекты размером от нескольких миллиметров до нескольких метров. Практические ограничения по объему построения накладываются физическими размерами вакуумной рабочей камеры и количеством доступного расходного материала.

История появления

С начала 80-х годов начали появляться различные методы 3Д-печати. В 1986 г. Карл Декарт предложил свою технологию, которая получила название селективное (выборочное) лазерное спекание. Его суть заключалась в действии на порошковые материалы (композиты, пластик, металлы) лазерного пучка, который приводил их к сплавлению и, таким образом, слой за слоем формировалась деталь.

В 1997 году была основана Шведская компания Arcam AB, которая усовершенствовала эту технологию и назвала ее электронно-лучевая плавка (Electron Beam Melting, EBM). Основное направление их деятельности – производство медицинских имплантатов, протезов и деталей для аэрокосмической отрасли из титана и его сплавов. Сегодня компания продала уже более 100 систем в 10 стран мира.

Материалы, используемые для ЗD-печати

Оборудование Arcam AB работает со следующими типами порошкообразных металлов:

Arcam Ti6Al4V, Ti6Al4V ELI . Это наиболее используемые в аэрокосмической и медицинской сферах титановые сплавы. Используется в виде гранул, размером 45-100 мкм.

Arcam ASTM F75 CoCr. Сплав на основе кобальта. Используется в производстве деталей для газовых турбин, а также в медицине для протезирования и различных имплантатов. Размер гранул порошка – 45-100 мкм.

Преимущества технологии

Детали, полученные по данной технологии, обладают лучшей микроструктурой чем такие же, изготовленные методом литья.

Высокая производительность оборудования электронно-лучевой плавки составляет 55-80 см3/час, в сравнении с 2-20 см3/час у схожих по размерам лазерных SLS-машин.

Точность изготовления деталей составляет ±0,2 мм на длине 100 мм.

3D-печать происходит при температуре в камере 700-1000°C. Это позволяет не остывать одной части детали в то время, как другая разогрета. Процесс охлаждения происходит равномерно по всей поверхности после окончания печати. Благодаря этому отсутствует эффект усадки и внутренних напряжений изделия, что влияет на ее прочность.

Возможность производства сразу нескольких изделий.

Недостатки

В данный момент электронно-лучевая плавка ограничена точностью 0,2 мм, из-за размера электронного пучка, который составляет 0,2-1,0 мм. Это приводит к небольшой шероховатости готовых изделий.

Фото готовых изделий по технологии электронно-лучевой плавки