

Технопарк высшей школы

От редакции. Мы создаём в журнале новую рубрику с уже не новым, но актуальным и даже модным названием. Мы думаем, что её наличие в нашем журнале важно. Потому что: 1. Технопарк — это точка роста и для экономики, и для общества в целом, а значит, и для нас тоже. 2. Стимулирует развитие общественного воспроизводства наука, а высшие учебные заведения — её питательная среда, и мы тоже считаем себя внутри этой среды. 3. Лидеры в области техники и технологии сначала производят знания на своей площадке, у себя «дома», а мы поддерживаем такие цели — быть на уровне лидеров. 4. Миссия нашей рубрики — способствовать обмену опытом, распространению инновационных технологий, исходящих из научной среды вуза. Мы надеемся, что эта рубрика будет вам не только интересна, но и полезна.

Александр Евгеньевич Волхонский, профессор кафедры «Технологии проектирования и эксплуатации летательных аппаратов» РГТУ-МАТИ имени К.Э. Циолковского, кандидат технических наук,

Кирилл Вячеславович Дудков, магистрант кафедры «Технологии производства летательных аппаратов» РГТУ-МАТИ имени К.Э. Циолковского

МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОТОТИПОВ И ДЕТАЛЕЙ АГРЕГАТОВ РАЗЛИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Описаны основные методы создания прототипов и деталей агрегатов и узлов изделий различных отраслей промышленности с применением современного оборудования, использующего аддитивные технологии. Представлены схемы 3D-принтеров, материалы, описаны режимы изготовления. Показаны перспективы применения различных методов послойного синтеза. Выполнены опытные работы по освоению одного из вариантов аддитивной технологии — FDM, для изготовления детали конструкции летательного аппарата.

На современном этапе развития промышленности вопросы разработки методов проектирования, изготовления и эксплуата-

ции различных объектов создаваемой техники являются такими же актуальными, как и много лет назад. В то же время современ-

ное состояние науки и техники позволяет решать эти вопросы более качественно. На этапах проектирования перед создателями любых аппаратов и машин стоят вопросы выбора оптимальной конструкции, проверки её на работоспособность, изготовления с минимальными затратами и с требуемым качеством. Обеспечение возможности проверки качества детали, технологичности, апробации её изготовления на различном оборудовании — важный элемент проектирования. Для этих целей в последнее время активно внедряются за рубежом и постепенно в нашей стране процессы быстрого прототипирования и производства (Rapid Prototyping and Manufacturing, RPM).

Аддитивные технологии, или технологии послойного синтеза, — сегодня одно из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства. Термин «аддитивные технологии» (Additive Fabrication — AF, Additive Manufacturing — AM) означает *изготовление изделия путём «добавления» материала*, в отличие от традиционных технологий механической обработки, в основе которых лежит принцип «вычитания» лишнего материала из заготовки. Аддитивные технологии предполагают формирование детали путём последовательного «наращивания» материала слой за слоем. Процесс «быстрого моделирования» или 3D-печати используется для изготовления различных объектов сложных форм из различного вида пластмасс и полимерных смол. В качестве материалов используются жидкие, порошковые, нитевидные полимеры; литейные воски; листовые материалы — бумага, ПВХ-плёнка; гипсовые композиции; плакированный литейный песок; металлические, керамические порошки и ряд других.

В эпоху инновационной экономики время, затраченное на производство товара, является важнейшим фактором успеха или неуспеха бизнеса. Даже качественно произведённый товар может оказаться невостребованным, если рынок к моменту выхода новой продукции уже насыщен подобными товарами компаний-конкурентов.

Технологии послойного синтеза являются мощным средством сокращения времени технологической подготовки производства (ТПП) при переходе к выпуску новых изделий в авиа- и ракетостроении, машиностроении и других наукоёмких отраслях, времени собственно изготовления и повышения качества создаваемых изделий. Поэтому всё больше отраслей промышленности активно осваивают AF-технологии.

В нашей стране имеются крупные компании, обладающие оборудованием высокого уровня, которые, как правило, решают достаточно сложные производственные задачи и оказывают широкий спектр услуг, сопутствующих прототипированию, способны от начала до конца провести НИОКР и проконтролировать качество работ на каждом этапе. Они представляют собой специализированные центры, обладающие как соответствующим оборудованием, так и всем комплексом программных продуктов, позволяющих в одном месте провести проектирование и решение инженерных задач по подготовке и созданию изделий наукоёмких отраслей промышленности. К ним можно отнести ФГУП «НАМИ», АБ «Универсал», НПО «Салют», ОАО «НИАТ» (Москва), УМПО (Уфа), НИИ «Машиностроительные технологии», ОАО «Тушинский машиностроительный завод» и ряд других [9, 10].

Основным препятствием применения в нашей стране АМ-технологий является то, что высокотехнологичное оборудование, способное обеспечить высокое качество изделий, стоит дорого и требует для эксплуатации и обслуживания квалифицированно-го, специально обученного персонала.

Однако 3D-печать — одна из самых интересных перспективных технологий, которые уже в этом году обещают стать по-настоящему массовыми. Ещё недавно упоминание 3D-принтеров вызывало ассоциации со шкафами стоимостью неплохого автомобиля. Теперь же домашний принтер, и довольно качественный, можно купить за те же деньги, что и хороший ноутбук, а установить его и начать работу — за 15 минут.

Сама по себе технология трёхмерной печати методом послойного нанесения микроскопических капель расплавленного пластика (экструзии) далеко не нова. Разработана она была в конце 1980-х, а первые коммерческие продукты появились в начале 1990-х. С тех пор подобные 3D-принтеры применялись в промышленности, разработке и в научно-исследовательских целях. Сфера применения была ограничена главным образом ценой — она составляла как минимум десятки тысяч долларов. В XXI в. с трёхмерными принтерами стало постепенно происходить то же, что в своё время с компьютерами — устройства становились не только совершеннее, но и компактнее и, главное, дешевле. Несколько лет назад технология пошла «в народ». Десятки фирм и просто группы энтузиастов по всему миру стали наперебой предлагать 3D-принтеры в виде как готовых продуктов, так и «полуфабрикатов», своего рода наборов «сделай сам». Всё это делалось с целью снизить цену, но вме-

сте с ней зачастую падало и качество. Всё-таки эффективно проследить за ним можно, лишь выпуская принтеры в заводских условиях. Понятно, что рано или поздно должны были появиться и массовые устройства, приобрести и освоить которые по плечу не только талантливому «самоделкину», но и рядовому дизайнеру, архитектору, инженеру или просто любопытствующему.

В мире существует около 40 фирм — производителей RP-машин, большинство из которых разработали и применяют оригинальные запатентованные технологии. Методы построения моделей, т.е. АF-технологии, могут быть разными и зависят от способов формирования слоя и его соединения (склеивания, спекания, сваривания) с общим массивом модели или изделия. Основные из них:

- стереолитография (Stereo Lithography Apparatus — SLA);
- селективное лазерное спекание порошковых материалов (Selective Laser Sintering — SLS);
- послойное наложение расплавленной полимерной нити (Fused Deposition Modeling — FDM);
- струйное моделирование (Ink Jet Modelling);
- ламинирование листовых материалов (Laminated Object Manufacturing — LOM);
- облучение УФ-лампой через фотомаску (Solid Ground Curing — SGC).

Стереолитография

Стереолитография (SLA — от Stereolithography Apparatus) — способ получения моделей посредством отверждения тонкого слоя жидкого фотополимера лучом ультрафиолетового

го лазера. Метод изготовления был запатентован в 1986 г. Чарльзом Халлом, основавшим впоследствии компанию 3D Systems (США) и которая является пионером в области практического освоения технологий быстрого прототипирования. Ею впервые была представлена для коммерческого применения стереолитографическая машина SLA-250 [1]. Лазерная стереолитография позволяет в считанные часы пройти путь от конструкторской или дизайнерской идеи до готовой модели вашей детали.



а)



б)

Рис. 1. Аппарат SLA-250 (а) и современный компактный 3D-принтер (б)

Суть процесса состоит в послойном изготовлении трёхмерных объектов из отверждаемой лазерным излучением жидкой олигомерной фотополимеризующей композиции (ФПК). *Олигомерное* вещество по химической структуре отличается от *полимерного* (пластик, резина) тем, что его молекулы-цепочки не бесконечно большие, а относительно короткие, состоящие из ограниченного количества звеньев-мономеров. Под воздействием специального реагента молекулы могут соединяться между собой и быстро создавать полимерные цепочки — вещество из вязкой жидкости становится твёрдым, *полимеризуется*. В качестве бытового примера можно привести эпоксидную смолу. Это двухкомпонентный **клей**, содержащий олигомерную «основу» и реагирующий с ней «отвердитель». При реакции состав полимеризуется по всему объёму, приклеиваясь к питательной поверхности.

В данной технологии нет необходимости отверждать весь объём целиком. Наоборот, необходимо «склеивать» на каждом слое только элементы тела детали и оставлять жидким окружающее пространство. Для этой цели в установке применён управляемый лазерный пучок, который и «указывает», каким зонам нужно полимеризоваться, обходя ненужные. В смолу же введён *фотонициатор* — вещество, подобное отвердителе в эпоксидной смоле. Однако оно реагирует не сразу, а только под действием лазерного освещения. В результате неосвещённые участки остаются жидкими, а освещённые — твердеют, формируя тело **детали-прототипа**.

Перед печатью трёхмерного объекта файл с чертежом детали, создаваемом на компьютере, импортируется из CAD-приложения в специальный формат — STL (рис. 2).

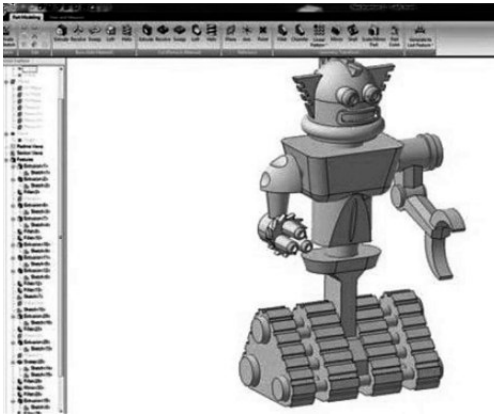


Рис. 2. Компьютерная модель для 3D-принтера

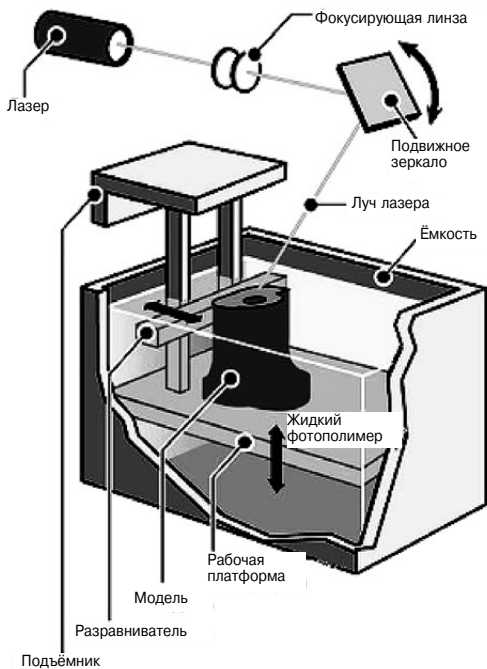


Рис. 3. Устройство и принцип работы 3D-принтера, использующего SLA-технологию

В начале работы с помощью специализированного программного обеспечения производится «нарезка» исходной компьютерной 3D-модели на слои. Далее **подвижная рабочая платформа**, на которой формируется изделие, опускается на толщину одного слоя, и лазером создаётся рисунок первого «среза» модели. Затем платформа снова опускается, поверхность заливается полимером, выравнивается, и на ней даётся рисунок следующего «среза» — и так слой за слоем, пока изделие не будет готово (рис. 3).

Таким образом может быть сформирован прототип любой геометрической формы. После окончания процесса модель извлекается из установки, очищается от остатков жидкой смолы и дополнительно полимеризуется.

Качество поверхности стереолитографических моделей весьма высокое, и часто модель не требует дальнейшей обработки. При необходимости качество поверхности может быть улучшено. «Зафиксированный» фотополимер хорошо обрабатывается, и поверхность модели может быть доведена до зеркальной.

Принтеры, использующие SLA-технология, имеют самое высокое разрешение печати среди аналогичных устройств (минимальная толщина слоя SLA-принтеров от 3D Systems доходит до 0,025–0,05 мм) и позволяют создавать гладкие и прочные модели с тщательной проработкой мельчайших деталей. Габариты «выращиваемых» в них изделий могут достигать 75×75×75 см, но и сами принтеры отличаются крупными размерами и большим весом: аппарат для печати даже небольших (25×25×25 см) фигур имеет размеры шкафа и весит около

полутонны. Кроме того, такие принтеры довольно дороги, ассортимент материалов не отличается разнообразием, а скорость печати не превышает нескольких миллиметров в час (по вертикали). Именно поэтому SLA-продукты от 3D Systems продаются, как правило, поштучно и в нашей стране особой популярности не получили [2].

Существует также разновидность стереолитографии, разработанная в 1987 г. израильской фирмой Cubital и получившая название Solid Ground Curing (SGC). От варианта 3D Systems она отличается способом засветки фотополимера. Процесс прототипирования в первых моделях напоминал ксерокопирование: на специальное стекло наносилась маска текущего слоя, а затем производилась его засветка сразу по всей поверхности посредством ультрафиолетовой лампы. В современных SGC-принтерах вместо маски используется DLP-матрица. Разрешение печати такого аппарата уступает SLA-аналогам (минимальная толщина слоя составляет 0,1 мм), но и цена заметно ниже. Скорость печати (по вертикали) SGC-систем доходит до 20 мм/час.

Преимущества лазерной стереолитографии:

- изготовление 3D-моделей любой сложности, в том числе тонкостенных и имеющих мелкие детали с высокими механическими свойствами;
- высокая точность построения и высокое качество поверхности при отсутствии ограничений по сложности исполняемой геометрии;
- используемый материал легко поддается обработке;
- скорость изготовления детали высока и легко настраивается;

- возможность использования различных полимерных смол;
- производство является безотходным, низкий расход материала, обуславливающий низкую цену.

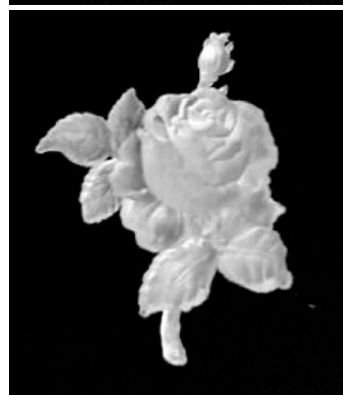




Рис. 4. Различные SLA-модели [1–3]

Селективное лазерное спекание порошковых материалов (Selective Laser Sintering — SLS)

Селективное лазерное спекание (рис. 5) — SLS-технология — ещё одно важное направление аддитивных технологий, разработанное в 1986 г. Карлом Декартом из Техасского университета. Здесь строительным (модельным) материалом являются сыпучие, порошкообразные материалы, а лазер является не источником света, как в SLA-машинах, а источником теплоты, с помощью которой производится сплавление частичек порошка.

Чтобы принтер мог использовать селективное лазерное спекание, требуется наличие мощного лазера, который сможет соединить пластиковые, металлические или керамические элементы в одно целое. Для работы с таким принтером также требуется создание виртуальной модели объекта. Лазер будет сканировать модель, сплавляя порошок из пластика или любого другого расходного материала. Процесс плавления порошка происходит поэтапно, и скорость печати зависит от скорости сканирования каждого разреза. Внутри камеры принтера не должно быть кислорода.

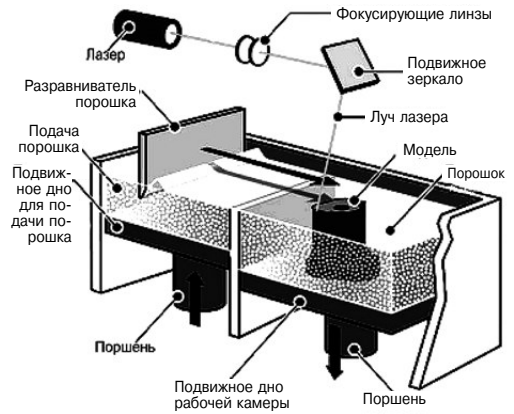


Рис. 5. Устройство и принцип работы 3D-принтера, использующего SLS-технологию



Рис. 6. 3D-принтер, использующий SLS-технологию — устройство компании RapidForm

Среди преимуществ технологии селективного спекания можно отметить её многофункциональность, так как она позволяет принтеру использовать несколько видов порошковых расходных материалов. В качестве таких модельных материалов используется большая номенклатура как полимерных, так и металлических порошков.

Машины, строящие детали из металла — поистине верх инженерного искусства. Здесь сконцентрированы самые передовые знания по металлургии, лазерной технике, оптике, электронике, системам управления, измерительным устройствам, механике, вакуумной технике и т.д.

Металл — это всегда была заветная мечта всех разработчиков аддитивных машин. Ведь металлическая деталь не просто модель, не макет, не «прототип» в разной степени приближения к нужному изделию, а это «настоящий» товар, конечное изделие с максимальной добавленной стоимостью. Поэтому послойное лазерное спекание (сплавление) металлопорошковых композиций привело к появлению отдельного направления SLS-технологии, которое стимулировало и развитие технологий получения порошков металлов. Сегодня номенклатура металлических композиций имеет широкий спектр материалов на основе никеля и кобальта, на основе железа, нержавеющей стали, титана и алюминия. Производятся порошки бронз, специальных сплавов, и даже драгоценных металлов, которые применяются для нужд дентальной медицины [3].

Из металлических порошков «выращивают» заготовки пресс-форм, специальные инструменты, оригинальные детали сложной конфигурации, которые затруднительно или невозможно получить литьем или с помощью механической обработки, импланты и эндопротезы и многое другое (рис. 7). Уже сейчас при штучном и мелкосерийном производстве зачастую становится экономически выгоднее «вырастить» небольшую партию деталей на SLS-машине, чем изготавливать литейную или штамповую оснастку.

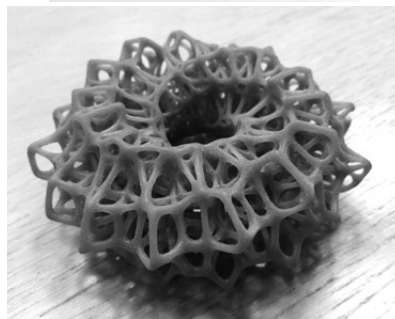
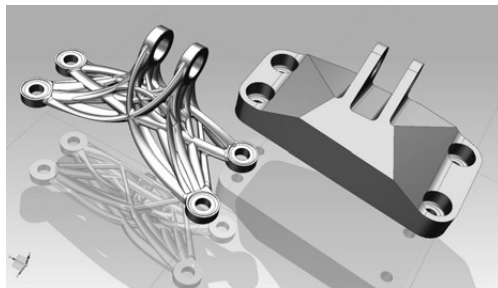




Рис. 7. Примеры деталей, выполненных с использованием SLS-технологий

Струйное моделирование (Ink Jet Modelling)

Различные запатентованные разновидности этой технологии называются: MJM (Multi Jet Modeling) — 3D Systems; PolyJet (photopolymer jetting) — Objet Geometries; DODJet (Drop-On-Demand-Jet) — SolidScape.

Все эти технологии имеют свои особенности, но функционируют по одному принципу. Печатающая головка, содержащая от двух до 96 сопел, наносит модельный и поддерживающий материал на плоскость слоя (рис. 8). После нанесения слоя могут проводиться его фотополимеризация и механическое выравнивание. В качестве поддерживающего материала обычно используется воск, а в качестве модельного — широкий спектр материалов, очень близких по свой-

ствам к конструкционным термопластам (рис. 8). Данный метод позволяет получать прозрачные и окрашенные прототипы с различными механическими свойствами — от мягких, резиноподобных до твёрдых, похожих на пластики. Производители принтеров: 3D Systems, Objet Geometries Ltd., SolidScape, Inc.

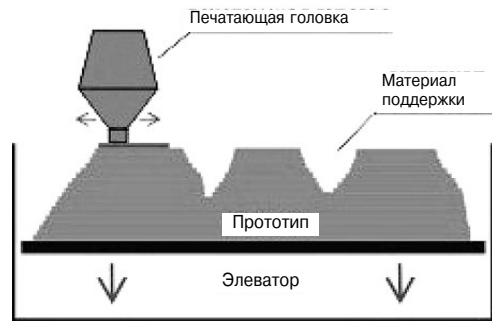


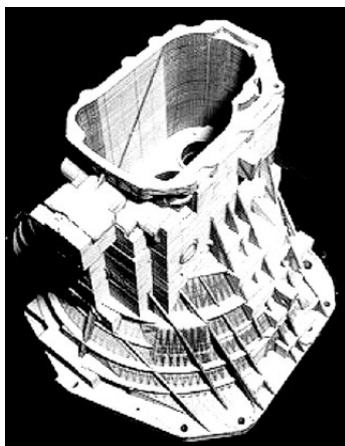
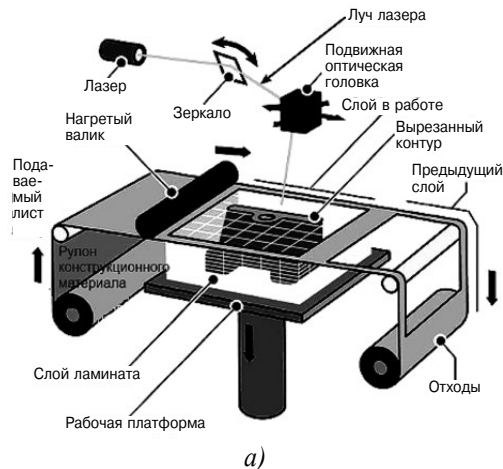
Рис. 8. Схема работы установки струйного моделирования (IJM)

Ламинирование листовых материалов (Laminated Object Manufacturing — LOM)

Слои прототипа создаются при помощи послойного склеивания плёночных материалов, например полимерной плёнки или ламинированной бумаги. Затем модель «вырезается» по контуру сечения в верхнем слое, а поверхность, которую затем нужно будет удалить, режется с помощью лазерного луча или режущего инструмента на мелкие квадратики. Каждый новый слой соединяется с предыдущим за счёт прокатки термоваликом, создаётся новое сечение, которое затем также вырезается (рис. 9). После того, как изделие было полностью изготовлено, мелко порезанные излишки материала легко удаляются вручную. Затем поверхность модели,

как правило, шлифуется, полируется или окрашивается [4].

Структура полученного прототипа получается похожей на древесную и может разрушаться под воздействием влаги. Основной производитель оборудования — Helisys, Inc.



b)

Рис. 9. Схема работы 3D принтера по технологии ламинирования листовых материалов (a) и модель (б), напечатанная 3D-принтером с технологией LOM

Облучение УФ-лампой через фотомаску (Solid Ground Curing — SGC)

Облучение ультрафиолетом через фотомаску — оно же Solid Ground Curing или SGC предполагает создание готовых моделей из слоёв распыляемого на рабочую поверхность фоточувствительного пластика. После нанесения тонкого слоя пластика он через специальную фотомаску с изображением очередного сечения обрабатывается ультрафиолетовыми лучами.

Неиспользованный материал удаляется при помощи вакуума, а оставшийся затвердевший материал повторно облучается жёстким ультрафиолетом. Полости готового изделия заполняются расплавленным воском, который служит для поддержки следующих слоёв. Перед нанесением последующего слоя фоточувствительного пластика предыдущий слой механически выравнивается. Процесс повторяется до полного построения модели [5].

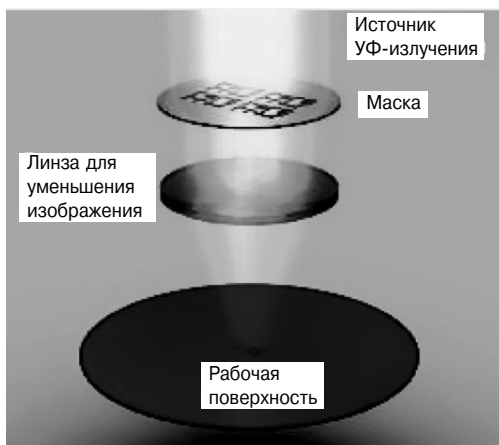


Рис. 10. Технология облучения ультрафиолетом через маску

Послойное наложение расплавленной полимерной нити (Fused Deposition Modeling — FDM)

Эта технология, разработанная компанией Stratasys, позволяет быстро изготавливать прототипы методом послойной укладки полурасплавленной полимерной нити в соответствии с геометрией математической модели детали, разработанной в системе CAD. Многие пользователи установок FDM рассматривают эту технологию как дизайнерскую. Иначе говоря, она является инструментом, тесно связанным с САПР и управляемым при помощи САПР, для визуализации и анализа дизайнерских идей на ранних стадиях разработки, позволяя значительно сократить временной разрыв между концепциями и их воплощением в жизнь.

Анализ изделий ракетно-космической техники показывает, что современный ЛА характеризуется разнообразием применяемых материалов, малыми сериями изготовления, состоит из деталей имеющих широкую номенклатуру, сложную геометрическую форму и использует широкий спектр технологий, несущих за собой огромный парк различного оборудования. К числу таких деталей можно отнести детали типа «колodka», применяемые в большом количестве для крепления трубопроводных магистралей различных систем летательных аппаратов.

FDM-принтер позволяет при изготовлении данной детали повысить её качественные характеристики, увеличить точность размеров рабочей поверхности, расширить функциональные возможности, увеличить надёжность, ресурс, к.п.д, а также улучшить другие эксплуатационные характеристики изделия в целом, не говоря уже о сокращении времени производства.

Применяемые материалы

Одним из наиболее востребованных термопластичных сополимеров в производстве сложных формованных изделий, требующих высокой точности изготовления, является АБС-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол) — термопластичный тройной сополимер стирола, акрилонитрила и бутадиена, стойкий и прочный полимер, хорошо подходящий для изготовления из него деталей различного назначения по технологии FDM и являющийся наилучшим материалом для работы с 3D-принтером. АБС-пластик — непрозрачный материал тёмного цвета с блестящей поверхностью, устойчивый к действию влаги, смазочных масел, растворов неорганических солей, кислот и щелочей, жиров и углеводов, нетоксичен. Растворяется в некоторых органических растворителях — ацетоне, эфире, бензоле, этиленхлориде, анилине, анизоле.

Чередование акрилонитрильных и бутадиеновых звеньев со стирольными фрагментами определяют эластичность и ударопрочность материала. По механической прочности, жёсткости, ударной вязкости и теплостойкости АБС-пластик превосходит другие сополимеры стирола, а также ударопрочный полистирол. Характеризуется хорошей износостойкостью, высокой размерной стабильностью. АБС-пластик хорошо поддаётся сварке. Поверхности из АБС-пластика пригодны для вакуумной металлизации и напыления гальванического покрытия.

К недостаткам немодифицированного АБС-пластика можно отнести относительно невысокие электроизоляционные свойства по сравнению с полистиролом, а также невысокую атмосферостойчивость, в частно-

сти чувствительность к действию лучей УФ-диапазона.

В зависимости от состава сополимера свойства АБС-пластика могут варьироваться

в широком диапазоне. Некоторые характеристики немодифицированного АБС-пластика приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физические характеристики АБС-пластика

Плотность	1,02–1,08 г/см ³
Прочность при растяжении	35–50 МПа
Прочность при сжатии	46–80 МПа
Прочность при изгибе	50–87 МПа
Усадка (при изготовлении изделий)	0,4–0,7%
Относительное удлинение	10–25%
Влагопоглощение	0,2–0,4%
Модуль упругости при растяжении при 23 °С	1700–2930 МПа
Ударная вязкость, по Шарли (с надрезом)	10–30 кДж/м ²
Твёрдость, по Бринеллю	90–150 МПа
Теплостойкость, по Мартенсу	86–96 °С
Температура размягчения	90–105 °С
Максимальная температура длительной эксплуатации	75–80 °С
Диапазон технологических температур	200–260 °С
Диапазон рабочих температур	от –40 до +85 °С

Физико-механические характеристики АБС-пластика определяются его структурой и могут быть изменены методом подбора исходных мономеров и варьированием их соотношений. Одной из основных задач модификации полимеров является корректировка в нужном направлении их свойств.

Например, АБС-пластик, устойчивый к действию УФ-лучей, может быть получен с использованием насыщенных эластомеров вместо бутадиена. Прозрачный АБС-пластик можно получить, если проводить сополимеризацию при участии четвёртого мономера — метилметакрилата. Введение же в качестве четвёртого мономера α -метилстирола или N-фенилмалеинида позволяет получить теплостойкий АБС-пластик, который

можно кратковременно нагревать до 110–130 °С и длительно эксплуатировать при температурах до 90–100 °С.

АБС-пластик можно вспенивать, наполнять высокодисперсными веществами, короткими стеклянными волокнами, антипиренами и другими компонентами, которые будут изменять его свойства.

Способность АБС-пластика плавиться при относительно невысоких температурах (около 100 °С) и снова затвердевать при остывании, не теряя при этом своих свойств, позволяет подвергать его вторичной переработке. Чистота АБС-пластика, полученного из вторсырья по современным технологиям разделения и переработки отходов может достигать 99%, что бесспорно явля-

ется ещё одним достоинством этого материала [4, 5].

Технология и техника эксперимента

В настоящее время на рынке существуют различные RPM-системы, производящие модели по различным технологиям и из различных материалов. Однако все современные системы быстрого прототипирования работают по схожему послойному принципу построения физической модели, который заключается в следующем:

- средствами CAD создаётся графическая 3D-модель детали (рис. 11, 12);
- готовая модель записывается в STL-файл (все современные CAD-системы твердотельного моделирования могут экспортировать файлы в формат стереолитографии);
- STL-файл (3D-модель) в формате STL передаётся в программное обеспечение 3D-принтера (установку быстрого прототипирования). Программа автоматически (или оператор вручную) располагает модель в виртуальном пространстве рабочей камеры (на столе). Затем программа автоматически генерирует элементы поддерживающих конструкций и проводит расчёт расходных материалов, а также времени выращивания прототипа;
- перед запуском процесса трёхмерная модель печати автоматически разделяется на горизонтальные сечения (слои) от $\pm 0,178$ – $0,254$ мм толщиной с помощью специальной программы, поставляемой с оборудованием и производится расчёт путей перемещения печатающей головки;

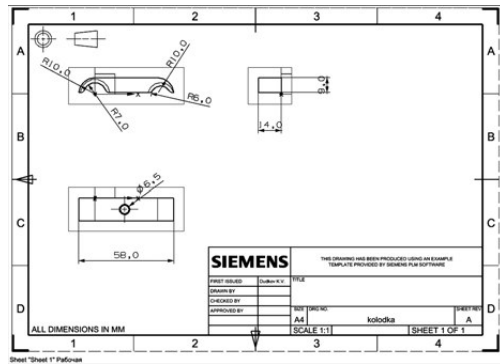


Рис. 11. Чертёж детали типа «колодка»



Рис. 12. Графическая 3D-модель детали

- запускается процесс печати: производится последовательное построение сечений детали слой за слоем нагревающей головкой (экструдером) с фильерой, которая расплавляет тонкую пластиковую нить (леску) и послойно укладывает её согласно данным математиче-

ской 3D-модели снизу вверх до тех пор, пока не будет получен физический прототип модели. Каждый последующий слой приваривается или приклеивается к предыдущему, и так до полного построения модели (см. рис. 13, 14). Результатом работы становится пластмассовый или металлический прототип (это зависит от расходного материала), который ничем не отличается от оригинала;

- по окончании создания модели проводятся финишные операции в зависимости от метода прототипирования и применяемого материала.

Дополнительные возможности: прототипы легко красятся обычной краской или автоэмалью; прототипы можно сверлить, полировать или шлифовать, подвергать любой механической обработке; части моделей легко склеиваются между собой любым клеем для пластика.

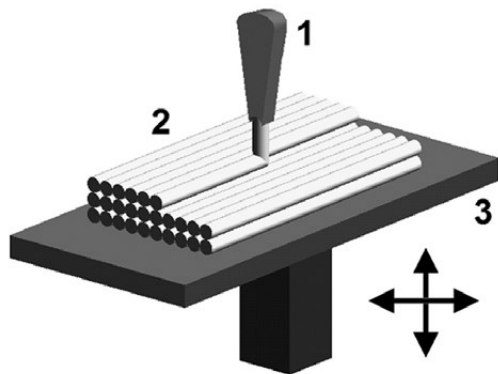


Рис. 13. Схема работы FDM-принтера:

- 1 — печатающая головка (экструдер);
- 2 — слой модели (расплавленная нить);
- 3 — основание на столе (холодная платформа)

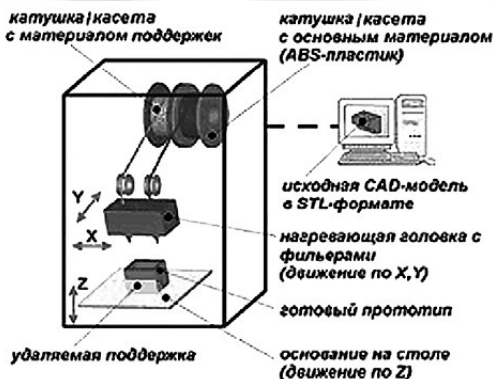
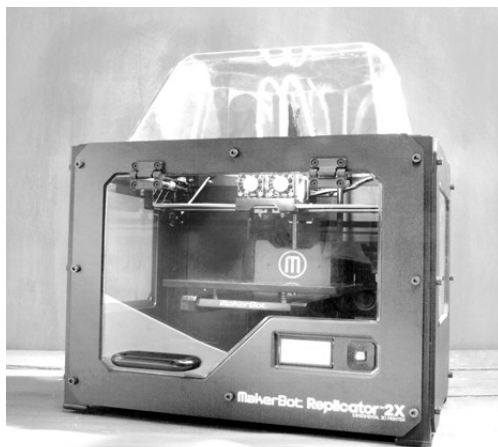


Рис. 14. FDM-принтер и принцип построения модели (детали)

Результаты и обсуждение

Изготовление (печать) деталей типа «колодка» проводилось на 3D-принтере Makerbot Replicator 2X (табл. 2). Принтер позволяет наносить слой в 100 мкм с высоким разрешением; при стандартной печати он достигает 270–340 микрон, что дало возможность получать детали с различными механическими свойствами. Размеры изготавливаемых деталей ограничиваются только размерами рабочей части [8].

Таблица 2

Технические характеристики 3D принтера Makerbot Replicator 2X

Фактический объём печати	24,6×15,2×15,5 см
Материал корпуса:	сталь с порошковым покрытием
Материал печати	АБС-пластик
Разрешение и точность	
Режим высокого разрешения:	100 мкм
Режим нормального разрешения	270 мкм
Режим для быстрой печати	340 мкм
Точность позиционирования	XY: 11 мкм
	Z: 2,5 мкм
Диаметр нити:	1,75 мм
Диаметр сопла:	0,4 мм
Программное обеспечение	
Комплект программного обеспечения:	MakerWare™ Bundle 2.0
Типы файлов:	STL, OBJ, thing
Поддерживаемые операционные системы:	Windows (XP/7), Ubuntu, Linux (10.04+), Mac OSX (10.6+)
Интерфейсы:	USB, SDcard [включая]
Рабочие условия	
Рабочая температура окружающей среды:	15–32 °С
Температура хранения:	0–32 °С
Входное напряжение:	100–240 В, ~4А, 50–60 Гц
Вес:	12,6 кг
Габаритные размеры:	49×42×53,1 см

Точность построения моделей составляет от 0,127 мм до 0,254 мм. Поверхность слегка ребристая (ступенчатая) (в пределах 0,2 мм) (рис. 15). Ребристость обусловлена тем, что расплавленная нить АБС-пластика (ABSPlus) имеет округлую форму и в процессе печати происходит быстрое охлаждение материала, что влечёт за собой усадку.

Изготавливаемые детали имеют разное процентное заполнение материалом рабочего объёма конструкции. Верхние четыре слоя выполнены со 100%-ным заполнением. Нижележащие слои выкладываются таким образом, что в горизонтальном сечении

образуется сотовая ячейка, размеры которой зависят от процентного заполнения детали исходным материалом. Масса полученных деталей «колодки» составила:

- со 100%-ным наполнением — 8 г (размер ребра внутренней ячейки близок к нулю);
- с 80%-ным наполнением — 4 г (размер ребра внутренней ячейки — 2 мм);
- с 50%-ным наполнением — 3 г (размер ребра внутренней ячейки — 4 мм).

Масса колодки из АБС в 2,5 раза легче колодки из алюминиевого сплава при равных характеристиках удельной прочности.

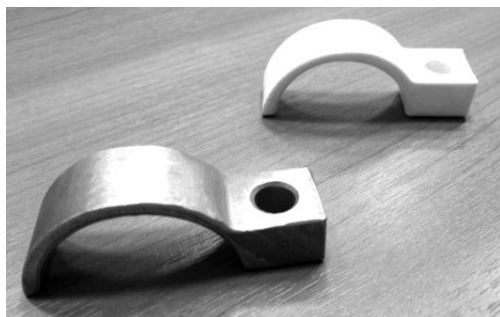
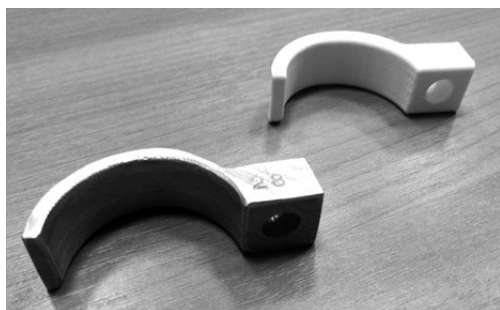


Рис. 15. Образцы изготовленных деталей типа «колодка»

Выводы

1. Технология послойного синтеза — готовое решение для печати прототипов или готовых деталей средних и больших размеров, с простой или средней сложностью поверхности. Она позволяет сократить время технологической подготовки производства (ТПП) при переходе к выпуску новых изделий в авиа- и ракетостроении и других наукоемких отраслях, время изготовления и повышает качество создаваемых изделий.

2. Технологические процессы послойного синтеза различных материалов позволяют создать прототип или модель изделия сложной формы в соответствии с твердотельной моделью детали, созданной на компьютере при проектировании.

3. Основным достоинством применяемого материала и метода изготовления является достаточная дешевизна, хорошие механические свойства (если необходимы работающие прототипы сложных механизмов), стабильность геометрических размеров, возможность последующей доработки (склейка, покраска).

4. Варьирование объёмного наполнения материала позволяет снизить массу изготавливаемых деталей, что даёт значительную экономию средств. Для более детального изучения характеристик необходимо провести испытания на прочность в соответствии с условиями работы детали в конструкции.

5. В настоящее время применение 3D-принтеров как в быту, так и в масштабах производства вряд ли возможно из-за стоимости их покупки и эксплуатации (цены на 3D-принтеры варьируются от нескольких тысяч до нескольких сотен тысяч долларов), однако разработчики RP-установок в последнее время ориентируются в основном на оптимизацию продукции и выпуск недорогих и быстрых машин, стремясь снизить стоимость и увеличивая объём рабочей камеры. Темпы развития технологий позволяют предполагать, что через несколько лет подобные установки не будут восприниматься как нечто необычное, а станут использоваться повсеместно.

Литература

1. Быстрое прототипирование. [Электронный документ] — Режим доступа: <http://mlbp.narod.ru/examples.htm>

2. История 3D печати. [Электронный документ] — Режим доступа: <http://www.orgprint.com/en/wiki/istorija-3d-pechati>

3. SLA-машины. Машины для выращивания моделей из фотополимерных композиций. [Электронный документ] — Режим доступа: <http://rp-salon.ru/katalog/3dsystems.html>

4. Популярные способы 3d-печати. [Электронный документ] — Режим доступа: <http://3dtoday.ru/3dprinters/instruction/1198>

5. Быстрое изготовление прототипов. [Электронный документ] — Режим доступа: <http://rp-salon.ru/main/proto.html>

6. *Парми Олсон*. Airbus исследует возможность строительства самолётов на гигантских 3D принтерах. [Электронный документ] — Режим доступа: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=15472.

7. Лаборатория трёхмерной печати. [Электронный документ] — Режим доступа: <http://www.lab3dprint.ru/support/425-abs-vs-pla>.

8. 3D принтер Makerbot Replicator 2X. [Электронный документ] — Режим доступа: [http://vektor.ru/product/3d-printer-makerbot-replicator-2x-rep2x/\(принтер\)](http://vektor.ru/product/3d-printer-makerbot-replicator-2x-rep2x/(принтер)).

9. *Агеев Р.В., Кондратов Д.В., Маслов Ю.В.* Применение аддитивных технологии при проектировании и производстве деталей аэрокосмических объектов. // Полёт, 2013, № 6. С. 35–39.

10. *Панферова Е.А., Струков А.Н., Струкова А.В., Мищенко В.Ю.* Методы создания прототипов изделия в аэрокосмической отрасли и применяемое оборудование. // Полёт, 2013, № 7. С. 29–33.