

1.20. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Цель лекции: *изучение особенностей применения аддитивных технологий в приборостроении.*

1.20.1. ОСНОВЫ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Одним из направлений развития современного промышленного «цифрового» производства является разработка и применение новых технологий. Использование более совершенных методов и материалов позволяет создавать более надежную, качественную и дешевую продукцию. Примером того, как новые разработки и оборудование улучшают традиционное производство, является использование аддитивных технологий. Аддитивные технологии, или технологии послойного синтеза, – одно из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства. Аддитивные технологии – это технологии построения изделия путём добавления материала (от английского add – «добавлять»), в отличие от традиционной технологии, где создание детали происходит путём удаления лишнего материала.

Аддитивные технологии производства позволяют изготавливать любое изделие послойно на основе компьютерной 3D-модели. Такой процесс создания объекта также называют «выращиванием» из-за постепенности изготовления. В зависимости от технологии, объект может строиться снизу-вверх или наоборот, получать различные свойства.

Аддитивные технологии получили широкое развитие начиная с середины 80-х годов прошлого века [7,14 - 18,27,37].

В 1980 г. Хидео Кодама (Муниципальный промышленный исследовательский институт Нагоя) подал заявку на регистрацию патента на устройство, которое с помощью УФ-засветки послойно формировало жесткий объект из фотополимерной смолы.

В 1983 году трое французских инженеров: Алэн Ле Мехо, Оливье де Витт и Жан-Клод Андрэ (Национальный центр научных исследований), предложили при создании "фрактальных объектов" применить лазер для превращения мономера в полимер.

В 1984 году Ч. Халл (США) предложил использовать технологию "стереолитографии" (SLA) для печати пространственных моделей по данным цифровых моделей из фотополимеризуемых композитных материалов [14].

В 1985 году Михайло Фейген предложил послойно формировать объемные модели из листового материала: пленок, полиэстера, композитов, пластика, бумаги и т.д., скрепляя между собой слои при помощи разогретого валика. Такая технология получила название «производство объектов ламинирования» (LOM)

В 1986 году К.Декарт и Б.Биман (Техасский университет в Остине) получили патент на метод селективного лазерного спекания (SLS).

В 1987 год – израильской компанией Cubital была разработана Технология послойного уплотнения (SGC).

В 1988 году Скотт Крамп предложил более простой и дешевый способ 3D-печати - FDM (Fused Deposition Modelling). FDM 3D-печать - это технология послойного наплавления пластикой нити [15].

В 1993 году Массачусетский технологический институт (MIT) патентует технологию трёхмерной печати 3DP (Печать склеиваемым порошком), подобную струйной технологии обычных 2D принтеров.

В 1993 году Michigan University, USA, разработан процесс направленного нанесения металла (Direct Metal Deposition - DMD);

В 1994 году в Liverpool University, UK предложен метод объемной лазерной наплавки (3D Laser Cladding) и метод объемной лазерной генерации (3D Laser generating, Fraunhofer-Institute of Production Technology (IPT), Germany);

В 1996 году Sandia National Laboratories & Sandia University (USA) разработан процесс лазерного формования (Laser Engineered Net Shaping - LENS);

В 1999 году предложен метод объемной лазерной сварки (3D Laser Welding, Southern Methodist University, USA);

В 2005 году Эдриан Боуэр (Университет Бата, Великобритания) инициировал открытый проект RepRap (Replicating Rapid Prototyper) — самовоспроизводящийся механизм для быстрого изготовления прототипов.

2008 год – Objet Geometries Ltd, разработала принтер Connex500, печатающий несколькими различными материалами сразу (3DP). Сейчас количество материалов перевалило за 100.

Томас Боланд (Клемсонский Университет) запатентовал использование струйной печати для 3D-печати живых клеток, что сделало возможным печать человеческих органов в будущем. 8 декабря 2010 год медицинская компания Organovo, Inc., объявила о создании технологии, которая сможет создавать искусственные кровеносные сосуды на 3д-принтере [18].

Параллельно шли разработки и других технологий [19, 34,53,54]. Обобщенная классификация основных аддитивных технологий представлена на рис. 1.184.

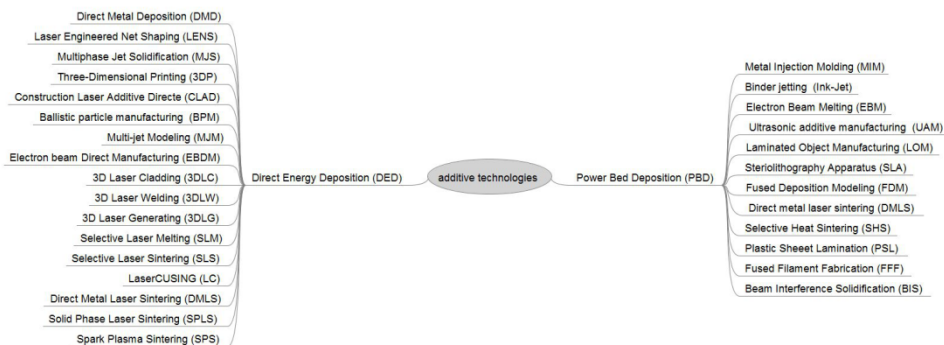


Рис. 1.184. Обобщенная классификация базовых аддитивных технологий

Аддитивные технологии активно используются в машиностроении, промышленности, науке, образовании, проектировании, медицине, литейном производстве и многих других сферах.

Первые аддитивные системы производства работали главным образом с полимерными материалами. Сегодня 3D-принтеры, олицетворяющие аддитивное производство, способны работать также и с инженерными пластиками, композитными порошками, различными типами металлов, керамикой, песком (табл. 1.35).

Таблица 1.37

Сравнительные характеристики материалов для аддитивных технологий

№	Название / форма материала / Вид технологии	Преимущества	Недостатки
1	2	3	4
1	PLA - пластик (полилактид) / проволока / FDM	- температура плавления (170-180 °С); - биоразлагаемый; - высокоэкологичный;	- повышенная хрупкость; - повышенная гигроскопичность.
2	ABS - пластик / проволока / (акрилонитрил-бутадиенстирол) / FDM	- долговечность; - прочность; - низкая себестоимость; - хорошая склеиваемость; - растворяется в ацетоне; - быстрое затвердевание; - хорошая адгезия к покрытиям.	- плохая термостойкость; - не устойчив к агрессивным средам; - склонность к деформации; - низкая адгезия к подложке; - токсичность паров.
3	Нейлон / проволока / FDM	- высокая износостойкость; - низкий коэффициент трения; - малое коробление; - хорошая адгезия слоев и покрытий;	- высокая гигроскопичность; - токсичность паров.
4	Металлы / порошки / SLS, SLM, MIM, UAM, MJS, DMD, LENS, CLAD, EBDM, EMB	- долговечность; - высокая прочность; - высокая износостойкость; - хорошая адгезия слоев и покрытий; - низкая гигроскопичность; - высокая термостойкость; - устойчив к агрессивным	- высокая себестоимость.

		средам.	
5	Керамика / порошки / SPLS	<ul style="list-style-type: none"> - долговечность; - высокая прочность; - малая плотность, легкость; - высокая износостойкость; - хорошая адгезия слоев и покрытий; - низкая гигроскопичность; - высокая термоскойкость (до 3500 °С); - радиационная устойчивость; - биосовместимость; - устойчива к агрессивным средам. 	<ul style="list-style-type: none"> - высокая себестоимость.
6	Пластик / Листовой материал / UAM, LOM	<ul style="list-style-type: none"> - долговечность; - прочность; - низкая себестоимость; - хорошая склеиваемость; - растворяется в ацетоне; - быстрое затвердевание; - хорошая адгезия к покрытиям. 	<ul style="list-style-type: none"> - плохая термоскойкость; - не устойчив к агрессивным средам; - склонность к деформации; - низкая адгезия к подложке; - токсичность паров.
7	Композитные смеси (термопластики, воски и фотополимерные смолы) / Гель / MJM, SLA	<ul style="list-style-type: none"> - высокая точность; - минимальная толщина слоя до 16 микрон; - высокое разрешение. 	<ul style="list-style-type: none"> - высокая себестоимость.
8	Гранулы металлов / Feedstock / EBDM	<ul style="list-style-type: none"> - долговечность; - высокая прочность; - высокая износостойкость; - хорошая адгезия слоев и покрытий; - низкая гигроскопичность; - высокая термоскойкость; - устойчив к агрессивным средам. 	<ul style="list-style-type: none"> - высокая себестоимость; - ограниченная доступность материалов.

Применение аддитивных технологий может значительно сократить затраты на разработку и внедрение вновь разрабатываемых изделий. К таким технологиям относятся методы трехмерного быстрого прототипирования. Они

предназначены для получения образцов, которые используют для визуальной оценки, тестирования или мастер-моделей при создании литейных форм.

Преимущества аддитивных технологий:

1. Возможность изготовления изделий со сложной геометрией, которые невозможно получить другим способом.

2. Изготовление изделий с улучшенными свойствами благодаря послойному построению изделия.

3. Большая экономия сырья, так как используется практически то количество материала, которое нужно для производства изделия. Потери сырья при традиционных способах изготовления могут составлять до 80-85%.

4. Мобильность производства и ускорение обмена данными за счет замены большого количества чертежей, замеров и громоздких образцов компьютерными моделями будущих изделий, которые можно передать в считанные минуты изготовителю — и сразу начать производство.

Медленный процесс трансформации традиционного отечественного производства связан с наличием следующих проблем:

1. Незрелость цифровой культуры.

2. Дефицит соответствующих специалистов, которые могут работать в динамичной цифровой экосистеме, как представители цифрового поколения.

3. Отсутствие стратегии привлечения специалистов, оптимизации процессов, внедрения новых технологий.

4. Отсутствие эффективных организационных структур, обеспечивающих применение аналитики данных.

5. Отсутствие качественной аналитики данных, которая обеспечивает доверие, подкрепленное прозрачностью и неопровержимостью информации.

6. Отсутствие надежных систем управления рисками и факторами дестабилизации операционной деятельности.

7. Отсутствие систем управления с цифровой совместимостью, поддерживающих сквозные процессы с партнерами по горизонтальной цепочке создания стоимости.

8. Отсутствие стандартов и инфраструктуры.

1.20.2. ВИДЫ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

3DP – струйная 3D печать (strujnaja-3D-pechat) - одна из наиболее старых технологий, разработана Массачусетским технологическим институтом.

Самые первые 3DP принтеры использовали в качестве расходного материала гипс, который склеивали водой. Современные экструдеры справляются также и с пластиками, песчаными смесями, некоторыми металлическими сплавами. Сама по себе технология недорогая, однако, в большинстве случаев изделие требует дополнительной постобработки и улучшения прочностных характеристик.

3DP работает по принципу послойного построения модели из порошкового расходного материала любого типа и назначения. После равномерного рас-

пределения каждого нового слоя порошка по рабочей поверхности печатная головка наносит на него связующий материал. Каждый последующий слой склеивается с предыдущим, образуя полноценную модель.

Одним из преимуществ метода является отсутствие необходимости использования опорных конструкций, как в технологиях FDM и SLA.

Область применения метода – биопечать для выращивания органической ткани.

SLA – стереолитография (Stereolithography) - самая первая технология 3D печати, изобретенная в 1984 и запатентованная в 1986 году Чарльзом Халлом, который первым в мире сконструировал устройство для изготовления плотных физических объектов путем наслоения жидкого фотополимера.

Как и в случае с пластиковой нитью, модель выращивается путем послойного вычерчивания лазером очертаний модели. В точках соприкосновения модели с лазером фотополимер застывает. По мере формирования каждого слоя рабочая платформа погружается в наполненный жидкой смолой бак для выравнивания поверхности. Этот цикл повторяется столько раз, сколько необходимо для завершения процесса прототипирования.

Главное преимущество стереолитографии – высокая точность. Это одна из самых точных технологий послойного синтеза, основанная на послойном отверждении жидкой фотополимерной смолы, лучом ультрафиолетового лазера или аналогичного источника энергии. Толщина слоя в зависимости от возможностей принтера может достигать 15 микрон, что в несколько раз тоньше волоса.

Используется для изготовления высокоточных изделий с различными свойствами в цифровой медицине, стоматологии, и ювелирном деле. Промышленные принтеры для SLA печати позволяют создавать объекты размером до нескольких метров.

FDM – послойное наплавление (Fused Deposition Modeling) разработано в 1988-ом году Скоттом Крапом на кухне. Технология послойного наплавления является самым простым и самым распространенным способом 3D-печати в мире, на основе которого работают миллионы 3D-принтеров — от самых дешевых до промышленных систем трехмерной печати. Файл для печати создаётся преимущественно в формате STL, позволяющем сегментировать виртуальную модель на слои. Он поддерживается всеми CAD программами автоматизированного проектирования и считается универсальным.

Пластиковая нить при попадании в экструдер нагревается до температуры плавления и дозированно подается через сопло на рабочую поверхность 3D принтера. Слой за слоем, толщина которого зависит от возможностей принтера, на рабочем столике выращивается готовый объект, контуры и геометрия которого точно соответствуют виртуальному прототипу. Полученные изделия отличаются высокой прочностью, гибкостью, прекрасно подходят для тестирования продукции, прототипирования, а также для изготовления готовых к эксплуатации объектов.

FDM-принтеры работают с различными типами пластиков, что позволяет изготавливать готовые изделия и их фрагменты различного размера, типа и назначения, определяемого физико-химическими свойствами материала.

DMLS – прямое лазерное спекание разработано известной мюнхенской компанией EOS и применяется для производства изделий из металла.

Файл в формате STL перед запуском печати разделяется на чертежи, каждый из них которых представляет один из слоев, создаваемых при построении модели.

Спекание металлического порошка обеспечивают достаточно мощные оптоволоконные лазеры. Небольшое количество металла подается в камеру построения и разравнивается с помощью специального валика. Лазерная головка движется по заданным в чертеже контурам и спекает свежий порошок в соответствии с контуром будущего изделия.

К достоинствам технологии относится высокая точность, толщина слоя достигает 20 микрон.

Прямое лазерное спекание – одна из наиболее производительных профессиональных промышленных технологий. Время прототипирования сокращается за счет увеличения количества лазеров без ущерба для точности.

SLM – селективная лазерная плавка (Selective laser melting) разработана сотрудниками Института лазерной техники.

SLM используется для прототипирования изделий из металлического порошка с использованием волоконного лазера высокой мощности.

На рабочую поверхность, которая находится в заполненной инертным газом (преимущественного аргоном) камере, наносится тонкий слой порошка. Полное отсутствие контакта металла с кислородом препятствует его окислению, что дает возможность работать даже со сложными с точки зрения обработки титановыми сплавами. Каждый новый слой сплавляется с предыдущим под воздействием направляемого в координатной плоскости лазерного луча. В качестве расходного материала используется нержавеющая и инструментальная сталь, золото, серебро, алюминий, титан и сплавы на основании кобальта и хрома. Эта технология считается лучшей для изготовления тонкостенных объектов со сложной геометрией, которые с успехом применяются в машиностроительной, авиакосмической отрасли промышленности, автопроме, медицине. Наиболее похожие технологии – прямое лазерное спекание металлов (DMLS) и электронно-лучевое плавление (EBM).

С помощью этой технологии можно быстро изготавливать сложные по геометрии металлические изделия больших размеров, которые по своим качествам превосходят литейное и прокатное производство (повышенная прочность, гибкость, термостойкость и др).

SLM позволяет печатать объекты с точностью в пределах 20-100 микрон.

SLS – селективное лазерное спекание разработано сотрудниками локализованного в Остине Университета Техаса К. Декардом и Д. Биманом.

В качестве расходного материала при выборочном лазерном спекании используют полимерные порошки для печати функциональных прототипов и изделий в мелкосерийном производстве. Ее суть состоит в последовательном послойном спекании порошкового расходного материала с использованием высокоомощных лазеров.

Порошковые пластики и металлы обрабатываются одним или несколькими углекислотными (как правило) лазерами – спекаются до образования физического объекта. Его контуры постепенно вычерчиваются в соответствии с цифровой моделью.

Одна из особенностей изготовленных таким методом изделий в том, что их плотность определяется не продолжительностью облучения, а максимальной энергией излучателя. Кроме того, для получения изделий селективным лазерным спеканием не требуется опорной структуры, которая характерна для FDM и SLA, так как поддержка навесных элементов будущей модели обеспечивается неизрасходованным материалом.

SLS иногда путают с SLM, но разница между этими методами состоит в том, что первый обеспечивает только частичное плавление порошкового сырья, степень которого достаточна для того, чтобы обеспечить надежное сцепление слоев, а во втором происходит полная плавка расходного материала с образованием монолитных моделей.

EBM – электронно-лучевое плавление (Electron Beam Melting) — аддитивная технология для работы с металлами, напоминающая технологию SLM, однако отличающаяся более высокой производительностью.

Ключевым отличием от других методов быстрого прототипирования является то, что в качестве источника энергии в этом случае вместо лазера используется электронный излучатель.

В процессе плавки высокоомощный электронный пучок воздействует на металлический порошок, который находится в вакуумной камере. Главным преимуществом EBM перед другими технологиями, в которых используются порошковые расходники, является то, что слои будущего изделия выращиваются постепенно, без контакта с кислородом и другими активными газами, благодаря чему и обеспечивается высокая плотность и прочность итогового изделия. На сегодняшний день метод электронно-лучевой плавки (EBM, Electron Beam Melting) является наиболее совершенным среди других технологий 3d-печати рис.1.185 Изначально рожденный в недрах аэрокосмической отрасли, этот метод начал завоевывать и гражданские сферы. Разработчиком EBM принято считать шведскую компанию Arcam AB. Порошок в нужном количестве устанавливается в вакуумную камеру и разравнивается скребком, после чего управляемый поток электронов “обходит” контуры модели первого слоя и расплавляет порошок, формируя прочную структуру.

Затем опять насыпается тонкий слой порошка и скребок разравнивает второй слой и все повторяется.

Сочетание вакуума и общей высокой температуры позволяет добиться яв-

ления так называемой разгрузки внутреннего напряжения. Финальное изделие получит прочность, сопоставимую с коваными сплавами.

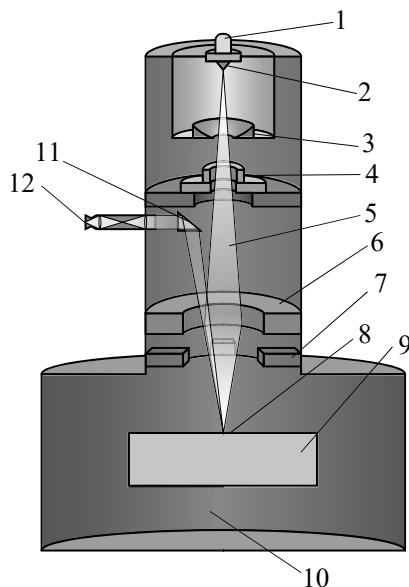


Рис. 1.185. Схема 3D-принтера, работающего по технологии EBM

1 – контакт с высоким напряжением; 2 – катод; 3 – отклоняющая чаша; 4 – анод; 5 – электронный луч; 6 – фокусирующая катушка; 7 – отклоняющая катушка; 8 – область плавления; 9 – изделие; 10 – вакуумная камера; 11 – призма; 12 – окуляр для наблюдения

Мощность электронного пучка 50–3500 W (с плавной регулировкой). Диаметр электронного луча (FWHM) 0.2 мм – 1.0 мм (с плавной регулировкой). Скорость сканирования 800 м/с. Скорость построения (эталонная модель ARCAM) 55/80 см³/ч (Ti6Al4V) Количество электронных лучей 1–100. Энергопотребление 3x 400 V, 32 A, 7kW Размер и вес 1850 x 900 x 2200 mm (W x D x H), 1420 кг.

Связь с CAD-программой на ПК. Формат CAD-файла: STL. Сетевое подключение Ethernet 10/100/1000. Настройки для максимально качественной поверхности. Имеются настройки на максимальную скорость построения. В качестве исходного строительного материала применяется металлический порошок, как правило — это титановые сплавы, но иногда используются и другие для получения каких-либо специфических свойств.

В отличие от других схожих технологий 3D-печати SLS и DLMS, этот метод не требует последующей температурной обработки для достижения высокой прочности. Кроме того, EBM работает быстрее и точнее благодаря высокой энергетической плотности электронного луча.

ЛОМ – трёхмерное ламинирование разработан известной в мире 3D компанией Helisys Inc и относится к технологиям быстрого прототипирования. Это – наиболее доступный и недорогой метод 3D прототипирования бла-

годаря невысокой стоимости расходников, однако разрешение уступает стереолитографии или выборочному лазерному спеканию.

Суть метода состоит в последовательном послойном склеивании пленочных или листовых материалов (металлической фольги, пластика и даже бумаги). Контур каждого нового слоя определяется параметрами лазерной резки. В процессе печати на рабочую платформу помещается первый слой материала с предварительно нанесенным клеевым слоем, лазер вычерчивает контур будущего изделия, лишний материал отсекается, платформа с готовым слоем сдвигается вниз, а в камеру подается новый лист.

Трёхмерное ламинирование позволяет изготавливать плотные и крупногабаритные изделия, толщина слоя которых зависит от выбранного материала производства.

К особенностям LOM относят необходимость постобработки готового изделия, однако, изделия хорошо поддаются постобработке.

SDL – селективно осаждающее ламинирование с использованием селективного осаждения не имеет ничего общего с уже знакомой нам технологии LOM. Резка бумаги в процессе SDL выполняется специализированными лезвиями, а с помощью принтера склеиваются только определенные фрагменты будущего изделия. Фактически это – 3D печать на бумаге и из бумаги.

Необычность процесса состоит в том, что первый лист бумаги устанавливается на поверхности сборочной пластины вручную,

Перед запуском принтера проверяют параметры сечения и выборочного нанесения клея. При этом используется 2 вида клея с разной плотностью – более плотный формирует каркас будущей модели, менее плотный – опорный каркас. Каждый новый лист бумаги отправляется точно в «проклеенную» область. Далее сборочная пластина перемещается вверх к раскаленному нагревательному элементу, и слои склеиваются между собой. После этого сборочная пластина возвращается в исходное положение и лишние фрагменты отсекаются.

SGC – масочная стереолитография появилась в 1986 году в Израиле. Технология SGC основана на высокоточном послойном построении модели с использованием фотополимерных смол и последующим ультрафиолетовым облучением физического фотошаблона будущего изделия, или по так называемой маске (отсюда и название). В результате материал полимеризуется, излишки удаляются из рабочей камеры, а все полости заливаются воском. В завершении каждого этапа построения модели возможна механическая обработка поверхности, после чего процесс печати возобновляется. В самом конце процесса воск выплавляют. Используемые в качестве расходного материала полимерные смолы по плотности и степени вязкости напоминают АБС-пластик. Это позволяет не применять в процессе печати поддерживающие структуры, как при SLA прототипировании, и помимо высокой точности в горизонтальной плоскости добиваться высокого разрешения и по вертикали.

Сегодня SGC в чистом виде практически не используется. Ей на смену пришла более совершенная технология FTI, напоминающая цифровую светодиодную печать.

DLP – цифровая светодиодная печать относительно молодая технология, которая считается одной из наиболее достойных альтернатив лазерной стереолитографии. В основе метода также лежит обработка фотополимерных смол, позволяющая добиться высокой точности при прототипировании. Вместо лазеров в DLP принтерах используются светодиодные световые проекторы, формирующие не только контур будущей модели, но и весь слой.

К преимуществам относят высокую точность (до 15 микрон), широкий диапазон механических и физико-химических характеристик фотополимерных смол и большой выбор цветовых решений.

DLP технология востребована в цифровой стоматологии, производстве сувениров, в области свободного дизайна и ювелирном деле, работающие в ней 3D принтеры постепенно вытесняют SLA оборудование.

MJM – многоструйное моделирование (Multi-jet Modeling) разработали и запатентовали специалисты всемирно известной компании 3D Systems для использования в линейке профессиональных 3D принтеров ProJet.

MJM - многоструйное моделирование с помощью фотополимерного или воскового материала. Эта технология позволяет изготавливать выжигаемые или выплавляемые мастер-модели для литья, а также прототипы различных изделий.

Уникальность данного метода в том, что он сочетает все лучшие черты технологий FDM, SLA и 3DP (трёхмерной струйной печати). Спектр расходных материалов достаточно широк – в него входят постепенно застывающие по мере охлаждения модели термопластики и воски, а также полимеризирующиеся под УФ-воздействием фотополимерные смолы. Воск также может использоваться для надстройки вспомогательных опорных элементов, а его дешевизна существенно удешевляет и стоимость прототипирования. MJM принтеры незаменимы в производстве образцов и деталей, требования к точности которых являются повышенными. Они востребованы в цифровой стоматологии, ювелирном деле, инжиниринге, промышленном дизайне.

CJP – цветная струйная печать (Color jet printing) — послойное распределение клеящего вещества по порошковому гипсовому материалу. На сегодняшний день — это единственная промышленная технология полноцветной 3D-печати. С ее помощью изготавливают яркие красочные прототипы продукции для тестирования и презентаций, а также различные сувениры, архитектурные макеты.

CJP – это одна из разновидностей 3DP, работающая с порошковыми расходными материалами, на тонкий слой которых при печати наносится связующий полимер.

В этой технологии легко можно создавать разноцветные модели с высокой геометрической сложностью, при этом неизрасходованное сырье может ис-

пользоваться в качестве опорной конструкции или в конце сеанса печати собираться для дальнейшего использования. В основном СДР принтеры работают с различными пластиками – от напоминающих по своим характеристикам силикон и резину и до ударопрочных и термически устойчивых материалов. В основном оборудование этого типа используется в промышленном и архитектурном дизайне, мультипликации.

При относительно невысокой стоимости производства преимущества этой технологии заключается также в высокой точности в воспроизведении геометрии и возможности создавать многоцветные изделия.

SHS – выборочное тепловое спекание основано на плавке. Как и другие технологии, построенные на плавке, этот метод подразумевает спекание пластикового или металлического порошка под воздействием источника тепловой энергии – это единственное значимое отличие от классики SLS.

В завершение формирования каждого слоя рабочая платформа опускается вниз, после чего на поверхность наносится с помощью роликового механизма новый тонкий слой расходного материала. Спекание слоев – контурное, соответствует виртуальной модели.

Такие 3D принтеры обладают меньшей энергетической отдачей и могут работать только с выбранными расходниками – пластиками и легкоплавными металлами, что ограничивает область их применения. Тем не менее, они популярны в области промышленного дизайна и несерийного производства объектов с высокими требованиями к детализации.

EBF₃ — производственная электронно-лучевая плавка - это высокотехнологичный современный аддитивный метод, разработанный специалистами NASA для изготовления моделей, качество которых настолько высоко, что они не требуют постобработки и могут сразу использоваться по своему прямому назначению.

Ключевая особенность EBF₃ — постепенное добавление материала, что существенно снижает его расход и одновременно обеспечивает высокую точность в послойном построении. В результате печати получают практически готовое изделие с высокой точностью соответствия геометрических характеристик виртуальному прототипу, отличные показатели плотности и качества поверхности. Камера для плавки металла (основной расходный материал) вакуумная, контур фиксируется подвижным электронным пучком, тонкая металлическая проволока подается в точку фокусировки. Металл моментально застывает, что делает процесс печати еще более быстрым. В этой технологии можно печатать высокоточные, геометрически сложные изделия размером от пары миллиметров до пары метров.

PolyJet — отверждение жидкого фотополимера под воздействием ультрафиолетового излучения, используется в линейке 3D-принтеров Objet американской компании Stratasys. Технология используется для получения прототипов и мастер-моделей с гладкими поверхностями.

ТЕСТЫ К ЛЕКЦИИ

Вопрос 1	Что такое аддитивные технологии
Ответы:	
1	Это технологии построения изделия путём добавления материала
2	Это технология тонкопленочного напыления
3	Это технология специального травления материала
Вопрос 2	Какие ограничения по формообразованию есть у аддитивных технологий?
Ответы:	
1	Нет ограничений
2	Возможно формообразование только тел вращения
3	Возможно формообразование только симметричных тел
Вопрос 3	По какому принципу работает 3DP – струйная 3D печать
Ответы:	
1	По принципу послойного построения модели из порошкового расходного материала любого типа и назначения
2	По принципу распыления жидких чернил
3	По принципу отсасывания ненужного порошка
Вопрос 4	По какому принципу работает SLA – стереолитография
Ответы:	
1	По принципу выращивания модели путем послойного вычерчивания лазером очертаний модели в жидком полимере
2	По принципу просвечивания лазером через фотошаблон
3	По принципу засвечивания лазером фоторезиста
Вопрос 5	По какому принципу работает FDM – послойное наплавление
Ответы:	
1	Пластиковая нить при попадании в экструдер нагревается до температуры плавления и дозированно подается через сопло на рабочую поверхность 3D принтера
2	По принципу наслоения листового материала
3	По принципу послойного снятия листового материала
Вопрос 6	По какому принципу работает DMLS – прямое лазерное спекание
Ответы:	
1	Порошок металла подается в камеру построения и разравнивается с помощью специального валика. Лазерная головка двигается по заданным контурам и спекает порошок послойно
2	Порошок металла подается тонкой струей под луч лазера и спекается
3	Суспензия из металлического порошка подается в камеру и спекается лучем лазера

Вопрос 7	По какому принципу работает SLM – селективная лазерная плавка
Ответы:	
1	Сплавление каждого нового слоя из металлического порошка осуществляется в среде инертного газа под действием лазерного излучения
2	Сплавление осуществляется в вакууме под действием лазерного излучения
3	Под действием мощного лазерного излучения осуществляется испарение материала из определённых мест согласно чертежу детали
Вопрос 8	По какому принципу работает SLS – селективное лазерное спекание
Ответы:	
1	Принцип состоит в последовательном послойном спекании полимерного порошкового расходного материала с использованием лазеров
2	Принцип состоит в последовательном послойном спекании тонких слоев полимерного материала
3	Принцип состоит в последовательном послойном спекании тонких, но широких нитей полимерного материала
Вопрос 9	По какому принципу работает EBM – электронно-лучевое плавление
Ответы:	
1	В процессе плавки высокомощный электронный пучок воздействует на металлический порошок, который находится в вакуумной камере
2	В процессе плавки высокомощный электронный пучок воздействует на металлический порошок, который находится в камере, заполненной инертным газом
3	В процессе плавки высокомощный электронный пучок воздействует на тонкую металлическую нить, которая расплавляется и создает контур детали
Вопрос 10	В чем заключается суть метода LOM – трёхмерное ламинирование
Ответы:	
1	Суть метода состоит в последовательном послойном склеивании пленочных или листовых материалов
2	Суть метода состоит в последовательном послойном ламинировании плоских деталей
3	Суть метода состоит в 3Д ламинировании объемных деталей