Фрагмент конспекта

А.С. Грицай

Печать точной копии цифровой модели. Виды 3D­печати. Типы принтеров.

# Слайд № 1

Печать точной копии цифровой модели. Виды 3D­печати. Типы принтеров.

# СЛАЙД № 2

Аддитивное производство (Additive Manufacturing) – это создание изделий, основанное на поэтапном добавлении материала на основу в виде плоской платформы или осевой заготовки. В самом термине «аддитивность» (от лат. additivus – прибавляемый) заложен основной принцип этого процесса. Такой способ изготовления также называют «выращиванием» из-за послойного создания изделия.

Таким образом, суть аддитивного производства – в сложении, а не вычитании. Если при традиционном производстве вначале имеется заготовка, от которой потом отсекается все лишнее, то в случае с аддитивными технологиями новое изделие создается из ничего, а точнее, из расходного материала.

# СЛАЙД № 3

Изобретение принадлежит Чарльзу Халлу, сконструировавшему первый стереолитографический трехмерный принтер.

9 марта 1983 года считается датой рождения 3D-печати — в этот день «монстр» Халла выдал что-то похожее на первую 3D-модель. Тогда Чак, как обычно, засиделся в лаборатории допоздна, экспериментируя с настройками аппарата. В последнее время полимер хоть и отвердевал равномерно, но превращался в спагетти из-за низкой спекаемости слоев. Но не в этот раз. Настройки были верными, клудж не подвел, и через 45 минут жужжания аппарат воспроизвел небольшую чашу.

Первый серийный 3D-принтер получил название SLA-1. Огромный и тяжелый шкаф не слишком подходил для презентаций, поэтому для демонстрации возможностей 3D-принтера Халл записал короткие видеоролики: «Эти фильмы были довольно банальны, но мы получили огромный отклик от наших клиентов».

# СЛАЙД № 4

Если при традиционном производстве вначале имеется заготовка, от которой потом отсекается все лишнее, то в случае с аддитивными технологиями новое изделие создается из ничего, а точнее, из расходного материала.

Например, в домашних 3D-принтерах – это специальная пластмассовая проволока. Но, как известно, из пластика можно печатать только не слишком прочные детали и предметы. Относительно недавно в 3D-сфере началась новая эра – печать из металлических материалов. Именно данная технология аддитивного производства является основой происходящей сейчас промышленной революции.

Таким образом, меняется сам привычный уклад производства – 3D-принтер не только добавляет производству мобильности, но и может заменить огромное количество оборудования на обычном заводе.

# СЛАЙД № 5

Среди других ключевых преимуществ – это снижение числа комплектующих частей создаваемых деталей.

Отсюда следует еще один важный момент – экономия исходного сырья и минимизация отходов. Аддитивные технологии позволяют в производстве использовать ровно столько материала, сколько требуется для конкретной детали. При традиционных способах изготовления потери сырья могут составлять до 85%.

Еще одна сильная сторона аддитивного производства – штучное изготовление изделия любой формы. Этим объясняется особый интерес к аддитивным технологиям медицины и авиационно-космической промышленности – отраслей, которые довольно часто требуют мелкосерийного производства.

# СЛАЙД № 6

Лазерное выращивание.

Селективное лазерное плавление (SLS) – технология изготовления сложных по форме и структуре изделий из металлических порошков. Сначала формируется равномерный слой порошка на подложке, а затем происходит плавление порошка при помощи мощного лазерного излучения.

Данная технология 3D-печати металлом способна с успехом заменить классические производственные процессы.

С помощью SLS разрабатывают детали, геометрию которых традиционными методами – точением или литьем – выполнить крайне сложно или вообще технически невозможно, – а на «выращивание» одной детали, к примеру, завихрителя, кронштейна, гребенки, уходит от 6 до 40 часов.

# СЛАЙД № 7

Второй вид лазерной технологии аддитивного производства «прямое лазерное выращивание» (DMLS) или «гетерофазная лазерная порошковая металлургия». Суть его заключается в том, что металлический порошок подается через специальное сопло непосредственно в ту же область, куда подводится лазерный луч, образуя локальную ванну жидкого расплава. Этот процесс можно образно сравнить с работой струйного принтера для бумаги.

Технология дает возможность подачи нескольких видов металлических порошков в зону выращивания. Таким образом можно создавать изделия с градиентными свойствами, например, одна часть детали может быть коррозионностойкой, а другая – жаростойкой.

Благодаря этому в десятки раз ускоряется процесс проектирования и создания новой техники.

# слайд № 8

Электронно-лучевая плавка (EBM) является еще одной технологией аддитивного производства. Этот метод, по сути, практически не отличается от SLS/DMLS печати металлом. Единственное отличие заключается в том, что вместо лазерного луча плавление осуществляется при помощи электроимпульсов. Технология печати методом электронно-лучевой плавки металлических порошков позволяет изготавливать детали практически любой сложности, даже совсем миниатюрные изделия размером 0,2-0,4 мм.

# Слайд № 9

Технология FDM подразумевает создание объектов при помощи послойного нанесения расплавленного материала. FDM дословно расшифровывается - fused deposition modeling или технология послойного наплавления.

Звучит сложно, но на самом деле технология очень проста. По сути, это как клеевой пистолет с термоклеем. С одной стороны, проталкивается термопластик или любой другой материал, который плавится от тепла, а потом застывает, не теряя свойств. Термопластик проходит через горячее сопло, плавится и сразу застывает. Экструдер и стол приводится в движение шаговыми двигателями, в процессе передвижения оставляя за собой пластик, слой за слоем, снизу-вверх, воссоздавая 3D модель.

Аналогом FDM можно назвать технологию MJM. Только в MJM используется воск или фотополимер. На печатающей головке расположено множество небольших сопел (от 96 до 448) через которые подается расплавленный воск, либо капельки фотополимера которые сразу засвечиваются лампой. Но об этом отдельно поговорим дальше.

# слайд № 10

В качестве материала для изготовления моделей используется пластиковая нить. Есть 2 диаметра пластиковой нити - 1,75 и 2,85 (3мм). Принтеры, которым нужна 3мм нить, встречаются редко, в основном это Ultimaker и его клоны. Большинство принтеров для печати используют нить 1,75.

3D-модель перед печатью подготавливают при помощи программы - слайсера. Слайсер разделяет модель на слои и подготавливает команды для передвижения печатной головы. Нарезанная модель может сохранятся в разных форматах, но по умолчанию используется GCode. Поэтому принтер в принципе является ЧПУ станком.

# слайд № 11

Метод был изобретен С. Скоттом Крампом в конце 1980 года. Патент получен в 1988 год. А уже в 1990 компания Stratasys появляется на рынке с первым промышленным 3D-принтером, работающим по технологии FDM.

Первые 3D принтеры были скорее дорогими промышленными станками, предназначенными для крупных компаний. Все начало меняться в 2006 году, после основания проекта RepRap (от англ Replicating Rapid Prototyper - самовоспроизводящийся механизм для быстрого изготовления прототипов).

Целью проекта было создания самокопирующегося 3D-принтера. В качестве рамы и направляющих использовались валы. Почти все детали соединялись печатными деталями. Экструдер и стол приводились в движение шаговыми двигателями. Исходный код был открытым. Конечно визуально он был похож на самоделку «из подручных материалов», но работал. В принтере используется около 50% печатных деталей.

# слайд № 12

Самое главное преимущество FDM печати - это доступность. Стоимость домашнего принтера сопоставима со стоимостью смартфона. При очень ограниченном бюджете можно найти OpenSource проекты и собрать принтер самостоятельно.

Большое разнообразие моделей.

Можно легко подобрать принтер под конкретную задачу. Например, Flashforge Adventurer 3, благодаря закрытому корпусу и отсутствию нагревательного стола, станет отличным подарком для ребенка. Anycubic Mega подойдет в качестве домашнего помощника для человека, любящего апгрейды и эксперименты. А Raise3D Pro2 подойдет для производственных задач.

Разнообразие материалов для 3D печати.

Благодаря массовости применения, помимо стандартных ABS и PLA, стали появляться разнообразные пластики. Например, декоративные пластики с имитацией различных материалов.

Инженерные - с улучшенными физико-механическими свойствами. С помощью этих материалов можно создавать функциональные изделия и прототипы.

Или спец. пластики для специфических задач. Например, выжигаемые с малой зольностью или выплавляемый воск.

# слайд № 13

Но есть и минусы.

Низкая точность по сравнению с другими технологиями печати.

Расхождение с 3D-моделью обычно не более 0,1мм. Это значение зависит от механики принтера и от характеристик материала. Для обычных шестеренок и бытовых нужд такой точности вполне достаточно. Но в некоторых отраслях (например, ювелирная) точность готовой модели должна быть выше.

На левом рисунке наглядно видна разница технологий печати, из чего можно сделать вывод, что SLA и SLS печатают более детализировано в отличии от FDM.

Слоистая поверхность.

На FDM 3D-принтере невозможно получить идеально гладкую поверхность. Слои на модели можно сгладить шлифовкой, шпатлеванием или обработав растворителем.

На правом отображена модель до (слева) и после обработки (справа).

# слайд № 14

Обязательно стоит упомянуть про проект RepRap.

При знакомстве с 3D технологиями пользователи часто сталкиваются с термином «ReRap». В этом разделе мы объясним, что такое технология RepRap и в чем ее преимущества.

Проект RepRap берет свое начало в 2005 году, когда 3D печать только начинала набирать обороты. Ее основоположником является доктор Эдриан Боуер, преподаватель машиностроения в британском университете Бата. Цель проекта RepRap заключается в предоставлении людям возможности наладить собственную производственную систему при минимальных затратах.

Изначально проект RepRap был открытым и все исходные материалы были доступны для скачивания в интернете. Деятельность велась через блог основателя, и любой желающий мог скачать интересующие чертежи и схемы. Собственно, доступность и является одним из основных преимуществ проекта.

# слайд № 15

3D принтер RepRap.

Технология RepRap расшифровывается как Replicating Rapid Prototyper. В дословном переводе – это «(само)реплицирующий(ся) механизм быстрого прототипирования». Именно возможностью самостоятельного воспроизведения собственных деталей 3D принтер RepRap интересен в первую очередь. С приобретением такого принтера пользователи получают возможность не только полноценной 3D печати разнообразными материалами, но и, при необходимости, изготовления аналогичного, «дочернего» устройства.

Такая полезная способность этого 3Д-принтера значительно снижает его себестоимость. Благодаря этому пользователь получает возможность производить достаточно сложные изделия, не организовывая при этом дорогую производственную инфраструктуру. Таким образом, данная технология позволяет любому человеку создавать необходимые объекты без особых затрат и усилий. Потратиться придется лишь на пластик для 3D печати.

Технология RepRap.

С момента основания технология RepRap получила множество положительных отзывов. 3D принтеры RepRap заслужили имя самых простых и доступных устройств для 3D печати на планете. Еще больший общественный резонанс вызвала новость о том, что 3Д-принтеры этого класса получили возможность воспроизводить электрические схемы. Это – новая ступень в разработке не самовоспроизводящихся устройств.

# слайд № 16

Метод многоструйного моделирования (multi jet modeling, MJM) — похожа на FDM, только вместо экструзии используется струйная печать.

В основе технологии лежит печатающая головка, особенность которой в том, что она содержит целую батарею мельчайших сопел, расположенных линейно в несколько рядов. Количество сопел обычно начинается от 96 для младших моделей принтеров и может достигать 448 для топовых моделей. В остальном здесь нет ничего неожиданного — головка наносит термопластичный материал слой за слоем, включая необходимые поддерживающие элементы.

Ранние модели принтеров применяли разновидности пластмасс, сейчас же эту нишу оккупировал специальный твёрдый воск, причём основной вид воска используется для построения модели. Другой же, более легкоплавкий воск, используется для построения поддерживающих структур, которые потом удаляются. В такой системе применяется уже две печатающие головки. Часто используют фотополимеры (почти как в SLA), чтобы придать объекту дополнительную прочность при погружении в ультрафиолетовую ванну.

# слайд № 17

Технология запатентована уже известной вам компанией. Речь идет всё про компанию 3D systems. Её принтеры ProJet серий 3500, 5000, 6000 и 7000 способны печатать с использованием целой гаммы материалов под общим названием VisiJet. Потребителю есть из чего выбрать, исходя из своих конкретных нужд: более гибкий или более твёрдый материал, светлый или тёмный, обычный или термостойкий. Точность изготовления составляет 0,025 — 0,050 мм, разрешение — 750 x 750 x 1600 DPI (в режиме самой высокой чёткости), а прочность на разрыв начинается от 25 МПа, что сравнимо с прочностью строительного бетона класса М300!

# слайд № 18

Лазерная стереолитография (laser stereolithography, SLA) — 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.

# слайд № 19

Laminated object manufacturing (LOM) – технология аддитивного производства, использующая листовой тип сырья. Изготовление объектов методом ламинирования подразумевает поэтапное склеивание листов бумаги, пластика или металлической фольги с последующим формированием контура при помощи лазерной резки.

Процесс трехмерного ламинирования мало чем схож с такими популярными аддитивными методиками, как послойное наплавление (FDM), многоструйное моделирование (MJM) или выборочное лазерное спекание (SLS).

Изготовление объектов методом ламинирования (LOM) происходит следующим образом:

• цифровая 3D-модель изделия загружается в LOM-аппарат;

• лист расходного сырья протягивается с подающего вала разогретым роликом над рабочей платформой;

• лазерный луч вычерчивает контуры слоя;

• обработанный лист опускается;

• новый лист с клейким покрытием поступает в рабочую камеру;

• процедура повторяется, и все последующие слои склеиваются между собой, образуя однородную субстанцию;

• после постройки модели по вычерченному лазером контуру удаляется весь лишний материал;

• механическая постобработка может включать шлифовку, сверление и др.

# слайд № 20

Новые аддитивные технологии приходят на замену традиционным способам в производстве, электронике, науке и других областях. У этих технологий есть много преимуществ:

• Сокращение рабочего процесса и значительное уменьшение производственных отходов. Создание деталей обычным способом довольно трудоемкий процесс. Сначала делается заготовка, потом вытачивается на разных инструментах. Это долго и в итоге образуется много отходов. При изготовлении деталей литьем, необходимо в начале изготовить формы. Использование 3Д-принтеров позволяет обходиться без предварительных заготовок, а материала требуется ровно столько, сколько уйдет на изделие без сопутствующих отходов.

• Сокращение материалов на изготовление и себестоимости изделий. С внедрением аддитивных технологий значительно сокращается количество материалов для изготовления деталей, а значит, себестоимость готового продукта будет ниже. В некоторых отраслях при традиционных способах производства производственные отходы могут составлять до 80%.

• Вариативность и индивидуализация изделий. Для изготовления разных вариантов изделия достаточно внести небольшие изменения в 3Д-модель. Это очень удобно, когда в сжатые сроки нужно усовершенствовать изделие или представить несколько вариантов. Также это хорошо для изготовления единичных деталей. 3Д-принтинг значительно облегчил работу конструкторов: больше не нужно ждать пока по схеме будут создавать изделие несколько дней, работа займет несколько часов.

• Изготовление деталей высокой сложности. С помощью традиционных методов вроде литья не всегда можно изготовить детали со сложной геометрической формой. Но на 3Д-принтерах можно вырастить практически любую модель, где каждый изгиб и угол будет в точности соответствовать компьютерному эскизу.

• Улучшенные характеристики готового изделия. Послойное изготовление позволяет создать продукцию, которая по своим характеристикам превосходит изделия, созданные традиционным способом. Например, детали, созданные на металлическом принтере по своим качествам намного лучше изготовленных с помощью литья или штамповки.

• Быстрота и легкость обучения персонала. Обучиться создавать трехмерные модели намного проще, чем обучение созданию таких изделий ручным способом. Тем более, что времени на это уйдет намного меньше.

• Мобильность производства. Сотрудник, создающий модели в программе, может находиться в любой части света. Аддитивные технологии позволяют быстро вносить корректировки и быстро пересылать готовые файлы коллегам по электронной почте.

• Точность размеров. У продукции, изготовленной с помощью аддитивных технологий, можно задать разметы с точностью до миллиметров.

• Экологичность. Использование 3Д-принтинга сокращает вредное влияние на окружающую среду. Выброс парниковых газов снижается за счет оптимизации процессов и использования меньшего количества материалов.

• Снижение веса деталей. Использование аддитивных технологий в некоторых отраслях позволяет изготавливать более легкие, но не менее прочные изделия. Например, двигатели для самолетов.

# слайд № 21

Соответственно для каждой технологии печати есть свои 3D-принтеры.

1. Селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering, SLS)

2. прямое лазерное спекание металла (Direct Metal Laser Sinterin, DMLS) или SLM Селективное лазерное плавление Selective laser melting

3. EBM

4. FDM

5. MJM

6. SLA

7. LOM

# слайд № 22

Селективное лазерное спекание (SLS) — это процесс аддитивного производства, относящийся к широкому семейству методов синтеза на подложке. В SLS лазер выборочно спекает частицы полимерного порошка, сплавляя их друг с другом и тем самым создавая слой за слоем. В качестве материала построения используются гранулированные термопластичные полимеры

Данная технология используется, как для создания прототипов функциональных изделий из полимеров, так и для интеграции в небольшие производственные циклы, поскольку предлагает полную свободу проектирования, высокую точность и производит детали с хорошими и стабильными механическими свойствами, в отличие от FDM или SLA.

Естественно, как и в любом другом случае, возможности технологии могут быть использованы в полной мере, только если принимать во внимание ее ключевые преимущества и недостатки, поэтому давайте подробно разберем ее особенности и принцип функционирования.

# слайд № 23

Процесс изготовления методом SLS работает следующим образом:

I. Камера с порошком, как и вся область печати нагревается чуть ниже температуры плавления полимера, после чего выравнивающее лезвие распределяет тонкий слой порошка по рабочей платформе.

II. СО2-лазер сканирует контур следующего слоя и выборочно спекает (сплавляет) частицы порошка полимера. Поперечное сечение компонента сканируется (спекается) полностью, поэтому деталь получается монолитной.

III. Когда слой завершен, рабочая платформа движется вниз, и лезвие вновь покрывает порошком поверхность.

Процесс повторяется до тех пор, пока вся деталь не будет готова.

После печати деталь полностью герметизируется в не спечённом порошке, поэтому перед тем, как её доставать, камера и порошок должны остыть. Остывание может занимать значительное количество времени, вплоть до 12 часов. Затем получившаяся деталь очищается от остатков порошка сжатым воздухом. Не спечённый порошок собирается для дальнейшего повторного использования.

Характеристики SLS-печати.

Параметры принтера.

В SLS практически все параметры печати устанавливаются производителем принтера. Высота слоя по умолчанию составляет 100-120 мкм. Например, 3D-принтер Sintratec позволяет печатать куда более тонким слоем, заявленная производителем толщина слоя варьируется от 50 до 150 микрон

# слайд № 24

Основным преимуществом метода SLS является то, что деталь не нуждается в поддержках. В данном случае не спечённый порошок играет роль необходимой поддержки. По этой причине методом SLS можно печатать геометрии любой формы, невозможные при печати любым другим методом аддитивного или субстрактивного производства.

При печати данным методом очень важно по возможности использовать максимальный объем области печати, особенно при мелкосерийном производстве. Независимо от количества деталей в области печати, при одинаковой общей высоте, печать займет одинаковое время. Это связано с тем, что именно этап повторного покрытия определяет общее время печати (само лазерное сканирование и спекание происходит очень быстро), и принтеру приходится циклически проходить одинаковое количество слоев. Так же, нужно учитывать время на перезаправку бункера порошком, ведь в камеру его высыпается одинаковое количество, независимо от размера печатаемой детали.

## Спекаемость слоёв

При использовании метода SLS прочность спекания слоёв между собой превосходна. Это означает, что напечатанные на SLS-принтере детали обладают почти изотропными механическими свойствами.

Отпечатанные на SLS детали имеют превосходные прочность на растяжение и модуль упругости, сравнимые с цельным материалом, но являются более хрупкими (их удлинение при разрыве намного ниже). Это связано с внутренней пористостью получившийся детали.

Типичная деталь, отпечатанная методом SLS, имеет пористость около 30%!

Пористость придает деталям, напечатанным на SLS, характерную зернистую поверхность. Также данный показатель пористости означает, что детали могут легко впитывать воду, и их легко красить. В тоже время, такие детали требуют специальной пост-обработки, если они будут использоваться во влажной среде.

## Усадка и деформация

SLS-детали подвержены усадке и деформации: при остывании вновь спеченного слоя его размеры уменьшаются и в нем накапливается внутреннее напряжение, из-за чего нижележащий слой вытягивается вверх.

Усадка от 3 до 3,5% является типичной для SLS-печати, и операторы принтера должны принимать её во внимание во время подготовки модели.

Большие плоские поверхности наиболее склонны к деформации. Эта проблема может быть немного нивелирована путем вертикальной ориентации детали на печатной платформе. Но всё же, лучший способ уменьшить деформацию — это свести к минимуму толщину плоских участков детали, и добавить вырезы в модель, там, где это позволяет конструкция. Данные действия также уменьшат общую стоимость детали, так как будет использовано меньше материала.

## Чрезмерное спекание

Чрезмерное спекание происходит, когда избыточное тепло вокруг контура детали плавит не спечённый порошок вокруг. Это чревато потерей детализации на небольших объектах, таких как прорези и отверстия.

Чрезмерное спекание зависит как от размера элемента, так и от толщины стенки. Например, прорезь шириной 0,5 мм или отверстие диаметром 1 мм будет успешно напечатано на стенке толщиной 2 мм, но не пропечатается, если толщина стенки будет 4 мм или больше. Как правило, прорези шириной от 0,8 мм и отверстия диаметром от 2 мм можно спокойно печатать в SLS, не опасаясь чрезмерного спекания.

## Удаление порошка

Поскольку при печати методом SLS не требуются поддержки, детали с полыми секциями печатаются быстро и точно.

Полые секции в данном случае уменьшают вес и стоимость детали, так как в конечном итоге используется меньше материала. Но в детали потребуется сделать выпускные отверстия, для удаления не спечённого порошка из внутренних полостей. Обобщенная рекомендация в данном случае – добавьте в вашу деталь как минимум 2 выпускных отверстия диаметром не менее 5 мм.

Если же требуется высокая жесткость, детали нужно печатать сплошными. Альтернатива здесь может состоять в том, чтобы сделать полую конструкцию, без выходных отверстий. Таким образом, порошок будет плотно утрамбован в детали, увеличивая его массу и обеспечивая некоторую дополнительную поддержку при увеличении механических нагрузок, не влияя на время печати. Так же, вместо одной цельной внутренней полости можно добавить сотовую структуру (аналогично узорам заполнения, используемым в FDM), чтобы дополнительно увеличить жесткость модели. Компоновка детали таким способом также поможет уменьшить деформацию.

## Пост-обработка

SLS производит детали с порошкообразной, зернистой поверхностью, которая легко окрашивается. Внешний вид напечатанных деталей SLS может быть улучшен до очень высокого стандарта с использованием различных методов последующей обработки, таких как: полировка, классическая окраска, окраска распылением и лакировка. Их функциональность также может быть улучшена путем нанесения водонепроницаемого покрытия или металлического покрытия.

## Преимущества и ограничения SLS

Обобщая вышесказанное, 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 S LA.

• 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.

# слайд № 25

Селективное лазерное плавление (SLM) и прямое лазерное спекание металла (DMLS) - это два процесса аддитивного производства, которые принадлежат к семейству 3D-печати, с использованием метода порошкового наслоения. Две этих технологии имеют много общего: обе используют лазер для выборочного плавления (или расплавления) частиц металлического порошка, связывая их вместе и создавая модель слой за слоем. Кроме того, материалы, используемые в обоих процессах, являются металлами в гранулированной форме.

Различия между SLM и DMLS сводятся к основам процесса связывания частиц: SLM использует металлические порошки с одной температурой плавления и полностью плавит частицы, тогда как в DMLS порошок состоит из материалов с переменными точками плавления.

В частности, SLM производит детали из одного металла, в то время как DMLS производит детали из металлических сплавов.

И SLM, и DMLS технологии используются в промышленности для создания конечных инженерных продуктов. В этой статье мы будем использовать термин «металлическая 3D печать» для обобщения 2-х технологий. Так же опишем основные механизмы процесса изготовления, которые необходимы инженерам для понимания преимуществ и недостатков этих технологий.

Существуют и другие технологические процессы для производства плотных металлических деталей, такие как электронно-лучевое плавление (EBM) и ультразвуковое аддитивное производство (UAM). Их доступность и распространение довольно ограничены, поэтому они не будут представлены в данной статье.

# слайд № 26

Как происходит 3D печать металлом SLM или DMLS.

Как работает 3D печать металлом? Основной процесс изготовления для SLM и DMLS очень похожи.

Камера, в которой происходит печать, сначала заполняется инертным газом (например, аргоном), чтобы минимизировать окисление металлического порошка. Затем она нагревается до оптимальной рабочей температуры.

Слой порошка распределяется по платформе, мощный лазер делает проходы по заданной траектории в программе, сплавляя металлические частицы вместе и создавая следующий слой.

Когда процесс спекания завершен, платформа перемещается вниз на 1 слой. Далее наносится еще один тонкий слой металлического порошка. Процесс повторяется до тех пор, пока печать всей модели не будет завершена.

Когда процесс печати завершен, металлический порошок уже имеет прочные связи в структуре. В отличие от процесса SLS, детали прикрепляются к платформе через опорные конструкции. Опора в 3D-печати металлом, создаётся из того же материала, что базовая деталь. Это условие необходимо для уменьшения деформаций, которые могут возникнуть из-за высоких температур обработки.

Когда камера 3D принтера охлаждается до комнатной температуры, излишки порошка удаляются вручную, например, щеткой. Затем детали как правило подвергаются термообработке, пока они еще прикреплены к платформе. Делается это для снятия любых остаточных напряжений. Далее с ними можно проводить дальнейшую обработку. Снятие детали с платформы происходит по средству спиливания.

Металлический порошок в SLM и DMLS пригоден для вторичной переработки: обычно расходуется менее 5%. После каждого отпечатка неиспользованный порошок собирают и просеивают, а затем доливают свежим материалом до уровня, необходимого для следующего изготовления.

Отходы в металлической печати, представляют из себя поддержки (опорные конструкции, без которых не удастся добиться успешного результата). При слишком большом обилии поддержек на изготавливаемых деталях, соответственно будет расти и стоимость всего производства.

Адгезия между слоями.

Металлические детали SLM и DMLS обладают практически изотропными механическими и термическими свойствами. Они твердые и имеют очень небольшую внутреннюю пористость (менее 0,2 % в состоянии после 3D печати и практически отсутствуют после обработки).

Металлические печатные детали имеют более высокую прочность и твердость и часто являются более гибкими, чем детали, изготовленные традиционным способом. Тем не менее, такой металл быстрее становится «уставшим».

Структура поддержки 3D модели и ориентация детали на рабочей платформе.

Опорные конструкции всегда требуются при печати металлом, из-за очень высокой температуры обработки. Они обычно строятся с использованием решетчатого узора.

Поддержки в металлической 3D печати выполняют 3 функции:

• Они делают основание для создания первого слоя детали.

• Они закрепляют деталь на платформе и предотвращают её деформацию.

• Они действуют как теплоотвод, отводя тепло от модели.

Детали часто ориентированы под углом. Однако это увеличит и объем необходимых поддержек, время печати, и в конечном итоге общие затраты.

Деформация также может быть сведена к минимуму с помощью шаблонов лазерного спекания. Эта стратегия предотвращает накопление остаточных напряжений в любом конкретном направлении и добавляет характерную текстуру поверхности детали.

Постобработка металла.

Различные методы пост. обработки используются для улучшения механических свойств, точности и внешнего вида металлических печатных изделий.

Обязательные этапы последующей обработки включают удаление рассыпного порошка и опорных конструкций, в то время как термическая обработка (термический отжиг) обычно используется для снятия остаточных напряжений и улучшения механических свойств детали.

Обработка на станках ЧПУ может быть использована для критически важных элементов (таких как отверстия или резьбы). Пескоструйная обработка, металлизация, полировка и микрообработка могут улучшить качество поверхности и усталостную прочность металлической печатной детали.

Преимущества и недостатки металлической 3D печати.

Плюсы:

1. 3D печать с использованием металла, может быть использована для изготовления сложных деталей на заказ, с геометрией, которую традиционные методы производства не смогут обеспечить.

2. Металлические 3D печатные детали могут быть оптимизированы, чтобы увеличить их производительность при минимальном весе.

3. Металлические 3D-печатные детали имеют отличные физические свойства, 3D принтеры по металлу могут печатать большим перечнем металлов и сплавов. Включают в себя трудно обрабатываемые материалы и металлические суперсплавы.

Минусы:

1. Затраты на изготовление, связанные с металлической 3D-печатью, высоки. Стоимость расходного материала от 500$ за 1 кг.

2. Размер рабочей области в 3D принтерах по металлу ограничен.

# слайд № 27

Выводы.

• 3D печать металлом наиболее подходит для сложных, штучных деталей, которые сложно или очень дорого изготовить традиционными методами, например, на станке ЧПУ.

• Уменьшение потребностей в построении поддержек, значительно снизит стоимость печати при помощи металла.

• Металлические 3D-печатные детали имеют отличные механические свойства и могут быть изготовлены из широкого спектра инженерных материалов, включая суперсплавы.

# слайд № 28

EBM (Electron Beam Melting — электронно-лучевая плавка) — один из методов 3D печати, который используется для производства металлических изделий. Моделирование при помощи электронного пучка в вакууме по своему принципу напоминает технологии SLS или DMLS, но отличается более высокими показателями качества готовых объектов.

Разработка EBM в том виде, в котором она применяется в современных 3D принтерах, была осуществлена в 2000-х годах шведской компанией Arcam — одним из ведущих европейских производителей различных деталей для авиакосмической отрасли и ортопедических компонентов. Технология была оценена по достоинству многими мировыми специалистами, поскольку позволяла создавать продукцию со сложной геометрией, высокими показателями точности и прочности.

Принцип работы EBM.

В качестве основного сырья для производства объектов по технологии EBM используется металлический порошок. Его спекание (плавление) происходит в вакуумной камере при помощи электронного пучка.

Процесс EBM происходит при повышенной температуре, как правило, от 700 до 1000°C, при этом электроны ускоряются в пучке до 150 000 км/сек, расплавляя металл и формируя слой за слоем готовую деталь. Минимальная толщина слоя составляет 0,05 мм, точность построения модели ± 0,2 мм.

# слайд № 29

Особенности технологии EBM.

Как уже отмечалось, по сравнению с технологией SLS, электронно-лучевая плавка может похвастаться более качественным результатом — напечатанную деталь не нужно подвергать дополнительной термической обработке, она может быть использована сразу после остывания. При этом все элементы этой детали отличаются высокой прочностью, в их поверхности отсутствуют какие-либо пустоты.

Именно поэтому изделия, созданные по технологии EBM, находят себе применение в отраслях, где точность, прочность и минимальное время производства играют решающие роли — в авиакосмической, оборонной и автомобильной сфере, в медицине для создания протезов и имплантатов.

В качестве основного расходного материала для EBM печати используется титан и его сплавы, иногда кобальт-хром.

# слайд № 30

Про FDM метод печати было уже сказано многое, поэтому сейчас пройдемся по процессу печати и схеме 3D-принтера.

Вот как работает процесс FDM:

Катушка из термопластичной нити загружается в принтер. Как только сопло достигнет необходимой температуры, нить подается в экструдер и в сопло, где она плавится.

Экструдер прикреплен к 3-осевой системе, которая позволяет ему перемещаться в направлениях X, Y и Z. Расплавленный материал выдавливается в виде тонких нитей и наплавляется послойно в заранее определенных местах, где затем охлаждается и затвердевает. Иногда охлаждение материала ускоряется благодаря использованию вентиляторов, прикрепленных к экструдеру.

Для заполнения печатной области, экструдеру требуется несколько проходов. Когда слой закончен, платформа перемещается вниз (или, как в некоторых моделях принтеров - экструдер перемещается вверх), и новый слой наплавляется на уже схватившийся. Этот процесс повторяется, пока модель не будет напечатана целиком.

# слайд № 31

Характеристики FDM принтеров.

Большинство систем FDM позволяют регулировать несколько параметров процесса печати. Такие как температура сопла, платформы, скорость печати, высоту слоя и скорость вентиляторов охлаждения. Они обычно устанавливаются оператором принтера, и не беспокоят моделлера.

Что важно с точки зрения моделирования, так это учитывать размер стола и высоту слоя самой детали:

Стандартный размер печатной области настольного 3D-принтера обычно составляет 200 x 200 x 200 мм, в то время как для промышленных машин он может достигать 1000 x 1000 x 1000 мм. Если настольный 3D принтер предпочтительнее (например, из соображений экономии), большУю модель можно разбить на более мелкие части и затем собрать/склеить.

Типичная высота слоя, используемая в FDM, варьируется от 50 до 400 микрон и может быть определена на этапе программного слайсинга. Меньшая высота слоя обеспечит более гладкую деталь и более точно отразит сложную геометрию, в то время как большая высота слоя, дает детали распечататься быстрее и с меньшими затратами. Высота слоя 150-200 микрон является оптимальной по соотношению времени печати и её качеству.

# слайд № 32

Деформация детали.

Деформация является одним из наиболее распространенных дефектов в процессе FDM печати. У некоторых видов пластика во время охлаждения после экструзии, происходит усадка. Поскольку разные участки охлаждаются с разной скоростью, их размеры также могут меняться с разной скоростью. Дифференциальное охлаждение вызывает накопление внутренних напряжений, которые вытягивают слой, тот, что снизу – наверх, деформируя его, как показано на рисунке ниже. С технической точки зрения, деформацию можно предотвратить путем более тщательного контроля температуры платформы и камеры в целом. За счет увеличения адгезии между деталью и платформой.

Моделлер также может снизить вероятность отклеивания и других дефектов, связанных с деформацией:

Большие плоские области (например, прямоугольная коробка) более склонны к деформации, и следует избегать такого рельефа, если это возможно.

Тонкие выступающие элементы (например - зубцы, шпили) также склонны к деформации. В этом случае можно избежать её, добавив немного материала поддержки по краю тонкого элемента (например, прямоугольник толщиной 200 микрон), чтобы увеличить площадь контакта.

Острые углы деформируются чаще, чем закругленные формы, поэтому слегка сгладив углы, можно добиться хорошего результата.

# слайд № 33

Поскольку расплавленный материал прижимается к предыдущему слою, его форма деформируется до овала. Это означает, что детали всегда будут иметь волнистую поверхность, даже при небольшой высоте слоя, и что мелкие элементы, такие как небольшие отверстия, могут нуждаться в последующей обработке после печати.

# слайд № 34

Multi Jet modeling — технология 3D-печати, основанная на многоструйном моделировании с помощью фотополимерного или воскового материала. Используется в 3D-принтерах компании 3D Systems серии ProJet.

Что лучше печатать: мастер-модели для литья в силикон, высокоточные прототипы, восковки, выжигаемые мастер-модели.

Преимущества: высокая точность построения, большой выбор материалов (в том числе, восковых).

Принцип печати напоминает струйную. В основе технологии — печатающая головка c целой батареей мельчайших сопел, расположенных линейно в несколько рядов. Количество сопел начинается от 96 для младших моделей принтеров и достигает 448 для топовых моделей. Одно сопло — одна мельчайшая капля модельного материала для построения изделия.

Печатающий блок движется вдоль рабочей поверхности и наносит слоя жидкого полимера. Следом за печатным блоком следует УФ-лампа, которая засвечивает только что нанесенные частицы материала, в результате чего тот затвердевает, формируя заданное изделие.

# слайд № 35

Преимущества технологии MJM.

Высокое качество готовых изделий. Технология MJM позволяет получать объекты с невероятно гладкими поверхностями и качественной детализацией. Построение прототипов из мельчайших капель жидкого фотополимера позволяет добиваться точности, которая, например, недоступна пластиковым 3D-принтерам.

Точность построения. Точность изготовления изделий по технологии MJM составляет 0,016—0,050 мм, разрешение печати — до 750x750x1600 DPI (в режиме самой высокой четкости), толщина слоя - от 16 микрон.

Большой выбор материалов. Как было сказано ранее, технология MJM позволяет работать как с полимерными, так и с восковыми материалами. Выбор фотополимеров позволит вам на одном устройстве печатать изделия с самыми разными задачами: мастер-модели, прототипы, тестовые образцы и прочее.

# слайд № 36

Стереолитография (SLA) - это процесс аддитивного производства, результат в котором достигается по средствам полимеризации смолы. В SLA печати, объект создается путем селективного отверждения полимерной смолы, слой за слоем, с использованием ультрафиолетового (УФ) лазерного луча. Материалы, используемые в SLA печати, представляют собой светочувствительные термореактивные полимеры, которые выпускаются в жидкой форме.

# слайд № 37

В резервуаре с жидким фотополимером размещается платформа, на одном уровне высоты от поверхности смолы.

Затем УФ-лазер по заранее установленному алгоритму селективно отверждает необходимые участки фотополимерной смолы.

Лазерный луч фокусируется на заданном пути с помощью набора зеркал, называемых гальвосами. Затем происходит засветка всей площади поперечного сечения модели. Поэтому полученная деталь получается полностью цельная.

Когда один слой закончен, платформа перемещается на безопасное расстояние, и лапка-перемешиватель внутри ванны перемешивает смолу.

Так и повторяется этот процесс до тех пор, пока деталь не будет напечатана. После печати деталь находится в не совсем отвержденном состоянии и требует дальнейшей постобработки под УФ лампой. По окончании УФ засветки деталь приобретает очень высокие механические и термические свойства.

Жидкая смола затвердевает с помощью процесса, называемого фотополимеризацией: во время затвердевания углеродные цепи мономера, из которых состоит жидкая смола, активируются под воздействием ультрафиолетового лазера и становятся твердыми, создавая прочные неразрывные связи друг с другом.

Процесс фотополимеризации необратим, и не существует способа перевести полученные детали обратно в жидкое состояние. При нагревании они будут гореть, а не плавиться. Это потому, что материалы, которые производятся по технологии SLA, сделаны из термореактивных полимеров, в отличие от термопластов, которые использует FDM.

# слайд № 38

Характеристики SLA принтера.

В системах SLA большинство параметров печати устанавливаются производителем и не могут быть изменены. Единственными входными данными являются высота слоя и ориентация детали (последнее, определяет местоположение поддержек).

Высота типичного слоя в SLA печати находится в диапазоне от 25 до 100 микрон.

Чем меньше будет высота слоя, тем более точно будет отпечатана сложная геометрия модели, но вместе с этим увеличится время печати и вероятность неудачи. Высота слоя в 100 микрон подходит для большинства распространенных геометрий и является золотой серединой.

Еще один важный параметр для оператора - размер платформы. Он зависит от типа принтера SLA. Существует два основных типа: ориентация сверху вниз и ориентация снизу-вверх.

В первом случае лазер стоит над баком, а деталь лицевой стороной вверх. Платформа стоит в самом верху чана со смолой и движется вниз после спекания каждого слоя.

При схеме «снизу-вверх» на SLA принтерах, источник света размещается под резервуаром со смолой (см. рисунок выше), и деталь строится вверх ногами.

Резервуар имеет прозрачное дно с силиконовым покрытием, которое пропускает луч света, но препятствует прилипанию отвержденной смолы. После каждого слоя отвержденная смола отделяется от дна резервуара, когда платформа движется вверх. Это называется этапом спекания. Ориентация «снизу-вверх» в основном используется в настольных принтерах, таких как Formlabs. Ориентация «сверху вниз» применяется в промышленных SLA принтерах.

Принтеры SLA «снизу-вверх» проще в изготовлении и эксплуатации, но размер возможной печати будет меньше, так как силы, приложенные к детали на этапе спекания, могут привести к сбою печати.

Принтеры же с ориентацией «сверху вниз» могут печатать детали очень больших размеров, без большой потери в точности. Широкие возможности таких систем естественно обходятся дороже.

# слайд № 39

На слайде наглядно показаны плюсы и минусы двух ориентаций в форме таблиц.

Таблица 1

|  |  |
| --- | --- |
| *«Сверху-вниз»* | |
| Плюсы: |  |
|  | Более низкая стоимость |
|  | Широкая доступность на рынке |
| Минусы: |  |
|  | Малый размер платформы |
|  | Меньший ассортимент материалов |
|  | Требует дополнительной пост-обработки из-за обширного использования поддержек |

Таблица 2

|  |  |
| --- | --- |
| *«Сверху-вниз»* | |
| Плюсы: |  |
|  | Очень большой размер платформы |
|  | Более быстрое время печати |
| Минусы: |  |
|  | Высокая стоимость |
|  | Требуется квалифицированный специалист-оператор |
|  | Смена материала предполагает опорожнение всего бака |

# слайд № 40

Изготовление объектов методом ламинирования (LOM) происходит следующим образом:

• цифровая 3D-модель изделия загружается в LOM-аппарат;

• лист расходного сырья протягивается с подающего вала разогретым роликом над рабочей платформой;

• лазерный луч вычерчивает контуры слоя;

• обработанный лист опускается;

• новый лист с клейким покрытием поступает в рабочую камеру;

• процедура повторяется, и все последующие слои склеиваются между собой, образуя однородную субстанцию;

• после постройки модели по вычерченному лазером контуру удаляется весь лишний материал;

• механическая постобработка может включать шлифовку, сверление и др.

Преимущества и недостатки LOM-печати.

Из явных достоинств технологии отметим общедоступность материалов. При этом изделия, напечатанные при использовании бумажных листов, по физическим характеристикам напоминают древесину, благодаря чему можно проводить соответствующую постобработку.

Однако у LOM-методики есть более совершенная конкурентная технология – выборочное ламинирование (SDL) от компании Mcor Technologies. Она отличается тем, что клей наносится лишь на области, которые указаны в расчетной модели. Такой подход делает постобработку быстрее, так как удаление лишних материалов проходит легче.

Применение методики ламинирования.

Основная сфера применения LOM-принтеров – прототипирование техники и создание архитектурных макетов. Технология также используется в сферах образования и дизайна, так как позволяет создавать изделия с минимальной себестоимостью.

И все же она более популярна в сфере производства объектов на заказ, чем для персонального или промышленного использования. Это обосновано тем, что при невысокой стоимости сырья сами LOM-аппараты гораздо дороже тех же FDM-принтеров.