

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Тема 1. Основы прототипирования	6
1.1 Общие термины	6
1.2. Преимущества и проблемы реализации аддитивных технологий	8
1.3. Классификация методов, систем и установок аддитивных технологий	11
1.4. Основы автоматизации процесса послойного создания изделия	15
1.5. Обобщенная схема операций при послойном создании изделия	21
1.6. Специфика работы на разных аддитивных установках	25
1.7. Пути повышения точности воспроизведения моделей и качества поверхности	27
1.8. Тесты производительности и контроля	32
1.9. Сравнительная оценка аддитивных установок по размерам рабочей камеры, точности и времени воспроизведения	33
1.10. Применение аддитивных технологий в различных отраслях промышленности, в образовании, сфере услуг, медицине	35
1.11. Дорожная карта развития аддитивных технологий	44
Контрольные вопросы	45
Тема 2. Технология 3D печати методом послойного наплавления	46
2.1. Подача пластика в экструдер. Расплавление пластика в экструдере	46
2.2. Послойное нанесение расплавленного пластика. Достоинства и недостатки применяемой технологии	50
2.3. Печать простейших прототипов и функциональных изделий из пластика	52
Контрольные вопросы	55
Тема 3. Технология 3D печати методом стереолитографии	56
3.1. Технологическое применение SLA	56

3.2. Технологическое применение DLP.....	59
3.3. LCD-технология, фотополимеризация с помощью жидкокристаллического экрана.....	62
3.4. Полимеризация пластика в ультрафиолетовой печи. Жидкие фотополимеры.....	65
3.5. Печать высококачественных и детализированных прототипов.....	67
3.6. Печать моделей для литья по выжигаемым моделям.....	69
Контрольные вопросы.....	75
Тема 4. Технология 3D печати методом многоструйного моделирования.....	76
4.1. Нанесение на платформу печатающей головкой через большое количество форсунок жидкого фотополимера. Послойное отверждение ультрафиолетовым проектором.....	76
4.2. Печать высококачественных и детализированных прототипов.....	78
4.3. Печать моделей для литья по выжигаемым и выплавляемым моделям..	81
Контрольные вопросы.....	84
Тема 5. Технология 3D печати методом цветного склеивания порошкового материала.....	85
5.1. Технология полноцветной струйной 3D-печати.....	85
5.2. Раскатывание ракелем или роликом по рабочей поверхности. Нанесением на слой специального связующего вещества. Склеивание в цельную деталь.....	87
Контрольные вопросы.....	89
Тема 6. Технология 3D печати методом селективного лазерного спекания....	90
6.1. Технология селективного лазерного спекания.....	90
6.2. Разравнивание порошка ракелем по рабочей поверхности. Заштриховывание контура детали при помощи импульсного излучения. Воздействие высокоэнергетического лазерного луча для спекания шаровидных пластиковых гранул между собой.....	92

6.3. Создание конечных изделий сложной геометрии. Легковесные конструкции. Функционально интегрированные детали.....	93
Контрольные вопросы.....	96
Тема 7. Технология 3D печати методом селективного лазерного плавления..	97
7.1. Селективное (выборочное) лазерное плавление.....	97
7.2. Разравнивание порошка ракелем по рабочей поверхности. Заштриховывание контура детали при помощи импульсного излучения.....	99
7.3. Воздействие высокоэнергетического лазерного луча для спекания сферических с металлическим наполнением гранул между собой.....	101
7.4. Создание конечных изделий сложной геометрии.....	102
7.5. Изготовление форм для литья пластика.....	105
Контрольные вопросы.....	106
Тема 8. Прототипирование в промышленности.....	107
8.1. Выбор материала для приложения и метода проектирования.....	107
8.2. Конструирование и дизайн.....	108
8.3. Построение моделей в архитектуре.....	110
8.4. Примеры применений в машиностроении, анализ и планирование.....	112
8.5. Производство оснастки в промышленности.....	116
8.6. Аэрокосмические приложения.....	118
8.7. Моделирование и создание беспилотных летательных аппаратов.....	123
8.8. Автомобильная индустрия.....	125
Контрольные вопросы.....	129
Список использованных источников.....	130

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии широко используются для прототипирования и распределенного производства в архитектуре, строительстве, промышленном дизайне, автомобильной, аэрокосмической, военно-промышленной, инженерной и медицинской отраслях, биоинженерии (для создания искусственных тканей), производстве модной одежды и обуви, ювелирных изделий, в образовании, географических информационных системах, пищевой промышленности и многих других сферах человеческой деятельности.

В связи с этим представилось целесообразным составить курс лекций «МДК 02.01. Теоретические основы производства изделий с использованием аддитивных технологий», где будут описаны различные технологии, лежащие в основе трехмерной печати.

Курс лекций «МДК 02.01. Теоретические основы производства изделий с использованием аддитивных технологий» составлен в соответствии с рабочей программой профессионального модуля ПМ.02 Организация и ведение технологического процесса создания изделий по компьютерной (цифровой) модели на аддитивных установках, которая входит в профессиональный цикл основной профессиональной образовательной программы в соответствии с ФГОС СПО по специальности 15.02.09 Аддитивные технологии.

Данный курс лекций «МДК 02.01. Теоретические основы производства изделий с использованием аддитивных технологий» предназначен обучающимся по специальности 15.02.09 Аддитивные технологии.

ТЕМА 1. ОСНОВЫ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

1.1. Общие термины

Сейчас очень важно представить новые продукты на рынок как можно быстрее, но для этого требуется сделать много шагов, выполнить множество процессов. Дизайн изделия, его тестирование, производство, оценка рынка — все это надо спрессовать и по времени, и по материальным затратам. Эффективно использовать имеющиеся ресурсы можно, только разрабатывая новые продукты и подходы. Одним из таких подходов является быстрое прототипирование.

Быстрое прототипирование (rapid prototyping in additive manufacturing) - применение аддитивного производства, направленное на снижение времени для производства прототипов.

Аддитивное производство (additive manufacturing) - процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки).

Прототип (prototype) – это вид изделия, получаемый одношаговым или многошаговым процессом и являющийся опытным образцом или рабочей моделью, который служит для предварительной оценки характеристик, дизайна или свойств изделия.

И как следствие, прототипирование — это процесс создания прототипов. Он начинается с выполнения компьютерной программы для построения реального (функционального) прототипа. Прототип характеризуют три важных аспекта.

1. Сборка прототипа выполняется из частей или компонентов.
2. Прототип может быть различным — от виртуального до физического.
3. Степень аппроксимации прототипа — от очень расплывчатого до идеально точной копии.

Сборка прототипа подразумевает создание конечного продукта из частей. Законченный прототип (модель) не полностью, но в основном характеризует

продукт. Это нужно, например, для группы людей, которые оценивают его внешний вид, какие-то функциональные качества или последующие операции с ним. Например, на прототипе можно тестировать угол наклона спинки офисного стула, чтобы снизить риск искривления позвоночника в результате продолжительного сидения. Прототип фрагмента черепа позволяет криминалистам (археологам) судить, каков был при жизни его владелец, а хирургам — спланировать ход операции по его восстановлению.

Другой аспект — как прототип будет произведен. Виртуальный прототип — это некая математическая модель, последовательность операции по изготовлению физического прототипа. Виртуальный прототип можно изучать еще на стадии дизайна и судить о его качествах, базируясь на законах физики. Например, визуализация течения потоков воздуха при обтекании крыла позволит оценить его подъемную силу, особенности поведения данной формы крыла на до- и сверхзвуковых потоках. Когда реальный прототип очень большой и дорогой в изготовлении, виртуальный прототип — хороший помощник. Макет сотового телефона очень помогает конструктору оценить, как он ляжет в руку, привлекателен ли эстетически.

Третий аспект — степень точности воспроизведения прототипа. Например, модель может лишь отдаленно напоминать реальный продукт, но позволит оценить его геометрические характеристики. Или, наоборот, грубая модель может внешне точно копировать реальный продукт, но быть изготовленной из различных материалов, чтобы оценить их привлекательность и функциональность. Ну и наконец, точная копия продукта, безусловно, нужна на финальной стадии выпуска его в производство.

Быстрое прототипирование обычно позволяет воспроизвести физический прототип довольно близким к реальному изделию. Многофункциональность и возможность сборки прототипа из отдельных частей дают ему неоспоримое преимущество перед конструкторским чертежом.

1.2. Преимущества и проблемы реализации аддитивных технологий

В настоящее время скорость и стоимость внедрения в производство новой техники напрямую зависят от эффективности работы каждой технологической цепочки на всех этапах от конструирования и проектирования изделия до создания его первоначального макета в натуральную величину. Резко ускорить прохождение этих этапов помогают внедряющиеся во всем мире высокотехнологичные методы трехмерного компьютерного моделирования и создания твердых копий деталей машин.

Актуальной является также задача сведения комплекса типовых процессов в единый технологический процесс (установку), позволяющий в сжатые сроки (за несколько часов вместо нескольких месяцев) изготовить прототипы инструментов и изделий с любой степенью сложности и точности внутренней или внешней поверхности без предварительных затрат на подготовку оснастки. Не менее нужным является умение изготавливать единичные копии моделей сложной формы в таких сферах человеческой деятельности, как протезирование или реставрационные работы.

Таким образом необходимо чтобы новые изделия (продукты) были как можно более быстро и дешево разработаны, произведены и представлены на рынок. Стандартные многоступенчатые процедуры конструирования и проектирования не способны обеспечить выполнение этих требований современной динамики производства. Поэтому процессы проектирования и производства должны быть непосредственно интегрированы в процедуру обработки. Речь идет об объединении уже хорошо развитых систем автоматического проектирования (САПР) (англ. Computer Aid Design (CAD)), реализованных на примере профессиональных пакетов программ типа КОМПАС-3D, с новой высокой технологией послойного синтеза объемных изделий и деталей машин.

В основе своей процессы быстрого прототипирования состоят из следующих шагов:

- подготовка геометрического образа трехмерного объекта,
- формирование поперечных сечений изготавливаемого объекта,

- послойное наложение этих сечений в процессе синтеза,
- комбинирование слоев из конкретного материала.

Таким образом, чтобы создать физический объект в ходе этих процессов, требуются данные лишь о поперечных сечениях. Кроме того, исчезают следующие проблемы, часто возникающие в связи с другими производственными процессами:

- Отпадает необходимость в топологическом проектировании и распознавании по элементам, поскольку планирование процессов, в ходе которого используется эта информация, не требуется. Достаточно иметь трехмерную поверхностную или твердотельную модель детали, на основе которой будут сгенерированы данные о поперечных сечениях.

- Не требуется определять геометрию пустого пространства, поскольку в ходе процессов быстрого прототипирования материал добавляется, а не снимается, как это делается на станке с ЧПУ.

- Не нужно определять несколько наборов оборудования или сложные последовательности обработки материала, поскольку деталь изготавливается за один прием.

- Нет необходимости рассматривать конструкции зажимов и креплений.
- Не нужно проектировать и изготавливать формы и штампы.

Технология быстрого прототипирования нужна:

- для проверки на выполнимость новых понятий (концепций) проекта;
- оценки пригодности/работоспособности разрабатываемых сложных механизмов;
- возможности параллельной разработки нового изделия (программы) в нескольких направлениях;
- реализации высокой точности, скорости и воспроизводимости копий деталей и машин;
- возможности прямого использования этих копий в тестовых испытаниях;
- изготовления эталон-моделей и мастер-форм в технологии литья.

Совмещение CAD- и технологий быстрого прототипирования предлагает инструментальные средства и процедуры, которые превосходно подходят для быстрого и эффективного в стоимостном плане преобразования виртуальных (компьютерных) образов (изделий) в рыночные продукты.

Выгоды использования технологии быстрого прототипирования:

- уменьшение time-to-market (время до выхода продукта на рынок);
- сокращение ошибок и проблем уже на стадии проектирования;
- высокая конкурентоспособность;
- улучшенное качественное управление производством;
- авторская защита понятий (концепций) проекта.

Недостатки аддитивных технологий:

- *Толщина слоя:* 0,02 мм — 0,1 мм.
- *Точность воспроизведения:* толщина слоев влияет на точность

воспроизведения. Хорошим считается результат порядка нескольких миллиметров. Воспроизводимость изделий обычно хорошая, но усадка присутствует практически всегда, составляет десятки микрометров и должна учитываться. Многие аддитивные технологии требуют наличия поддержек, что увеличивает время изготовления, требует постопераций по их удалению и ухудшает шероховатость поверхности.

- *Размеры изделий:* в основном ограничены размерами камеры синтеза.
- *Материалы:* для каждой технологии их спектр ограничен.
- *Прочность изделия:* послойное построение изделий предполагает

ухудшение прочности в направлении роста.

- *Скорость изготовления:* от нескольких часов до нескольких дней.
- *Стоимость изготовления.*
- *Системная интеграция:* установки до настоящего времени работают

независимо друг от друга, хотя большинство связаны посредством Интернета с CAD - станциями. Уход за установкой и постоперации все еще требуют большого количества ручного труда.

1.3. Классификация методов, систем и установок аддитивных технологий

Организация ASTM, занимающаяся разработкой отраслевых стандартов, разделяет аддитивные технологии на семь категорий.

1. **Material Extrusion** - выдавливание материала. В точку построения по подогретому экструдеру подаётся пастообразный материал, представляющий собой смесь связующего и металлического порошка. Построенная сырая модель помещается в печь для того, чтобы удалить связующее и спечь порошок, так же, как это происходит в традиционных технологиях. Эта аддитивная технология реализована под марками MJS (Multiphase Jet Solidification - многофазное отверждение струи), FDM (Fused Deposition Modeling - моделирование методом послойного наплавления), FFF (Fused Filament Fabrication - производство способом наплавления нитей).

2. **Material Jetting** - разбрызгивание материала. Например, в технологии Polyjet воск или фотополимер по многоструйной головке подается в точку построения. Эта аддитивная технология также называется Multi Jetting Material.

3. **Binder Jetting** - разбрызгивание связующего. Например, струйные Ink-Jet-технологии впрыскивания в зону построения не модельного материала, а связующего реагента (технология аддитивного производства ExOne).

4. **Sheet Lamination** — соединение листовых материалов, представляющих собой полимерную плёнку, металлическую фольгу, листы бумаги и др. Используется, например, в технологии ультразвукового аддитивного производства Fabrisonic. Тонкие пластины из металла сваривают ультразвуком, после чего излишки металла удаляют фрезерованием. Аддитивная технология здесь применяется в сочетании с субтрактивной.

5. **Vat Photopolymerization** - фотополимеризация в ванне. Технология использует жидкие модельные материалы - фотополимерные смолы. Примером могут служить SLA-технология компании 3D Systems и DLP-технология компаний Envisiontec, Digital Light Procession.

6. Powder Bed Fusion - расплавление материала в заранее сформированном слое или последовательное формирование слоев порошковых строительных материалов и выборочное (селективное) спекание частиц строительного материала. В категорию Powder Bed Fusion входит многочисленная группа SLS-технологий, в которых в качестве источника тепла применяется лазер. К этой же категории относят такие технологии, как Arcam-технология, использующая электронный луч, и технология SHS (Selective Heat Sintering), в которой источником тепла являются ТЭНы.

7. Directed energy deposition - прямое подведение энергии в место построения. Материал и энергия для его плавления поступают в точку построения одновременно. Рабочий орган — головка, оснащённая системой подвода энергии и материала. Энергия поступает в виде сконцентрированного пучка электронов (компания Sciaky) или луча лазера (компании POM, Optomec). Иногда головка устанавливается на «руке» робота.

В некоторых классификациях аддитивные технологии подразделяют по следующим методам:

1) формирования слоя (рис. 1.1);

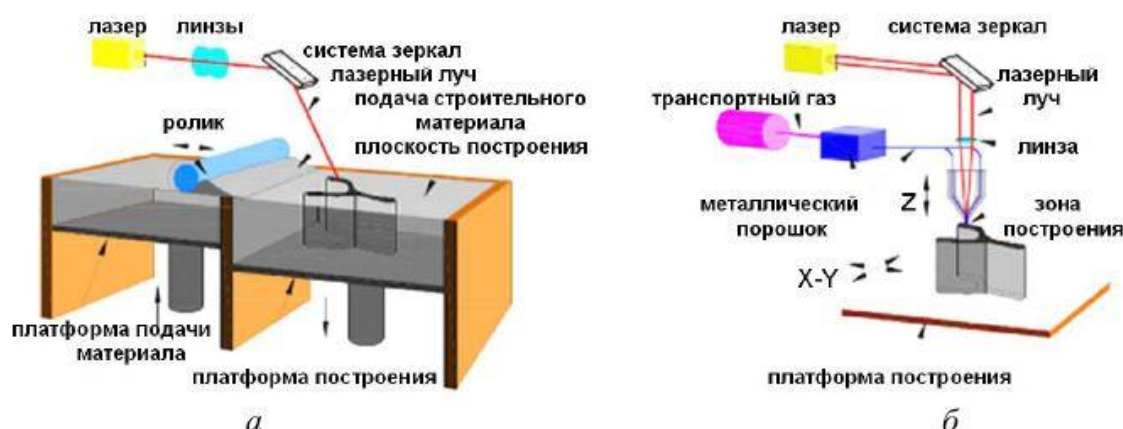


Рисунок 1.1 - Классификация аддитивных технологий по методу формирования слоя: а - Bed Deposition; б - Direct Deposition

2) фиксации слоя (рис. 1.2);

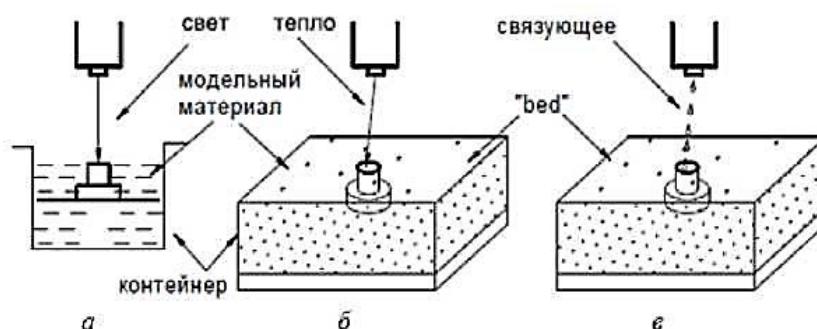


Рисунок 1.2 - Классификация аддитивных технологий по методам фиксации слоя: *а* — фотополимеризацией; *б* - сплавлением; *в* - склеиванием

3) по применяемым строительным (модельным) материалам:

- жидким - фотополимеры (акриловые, эпоксидные и др.)
- сыпучим (порошки): полимеры - полиамид, полистирол, полиметилметаакрилат (ПММА), воск и др.; керамика - SiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 и др.; металлы - Al, Cu, Ti-Al, Ti-Al-V, Ag, Au, Co-Cr, Inconel, Ni-Fe, инструментальные стали и др.; композиционные материалы, например, металлокерамика Co-WC;
- нитевидные, прутковые: полимеры - АБС, полиуретан и др.; металлы (аналогичные порошковым);
- листовые, пленочные: полимеры - ПВХ-пленки и др.; металлы - металлическая фольга, листовой прокат.

4) по ключевым технологиям (лазерным, нелазерным) (рис. 1.3);

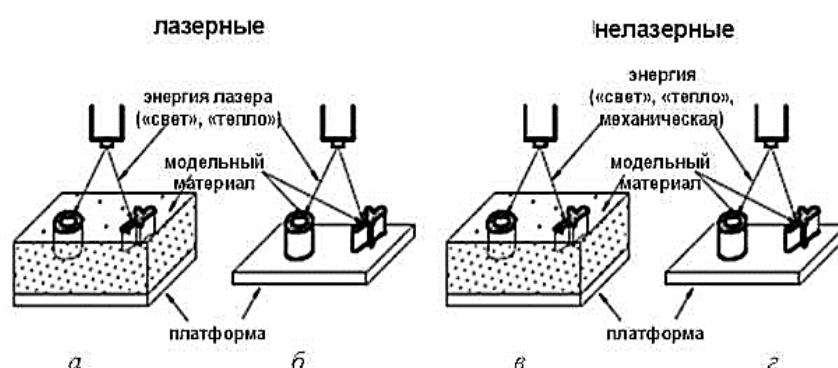


Рисунок 1.3 - Классификация аддитивных технологий по ключевым технологиям: *а, в* - Bed Deposition; *б, г* - Direct Deposition

5) по методам подвода энергии для фиксации слоя построения:

- с помощью теплового воздействия,
- облучения ультрафиолетовым или видимым светом,
- посредством связующего состава и т.д.

С развитием технологических методов и оборудования, применяемого для производства деталей с помощью аддитивных технологий, приведенные классификации, очевидно, будут расширяться и дополняться. На рис. 1.4 приведена более подробная классификация аддитивных технологий с учетом физического состояния и механизма нанесения материала в процессе формирования детали.

Тем не менее, из всех перечисленных классификационных признаков следует выделить, пожалуй, первый, принципиально отличающий два вида аддитивных технологий, определяемых как Bed Deposition и Direct Deposition.

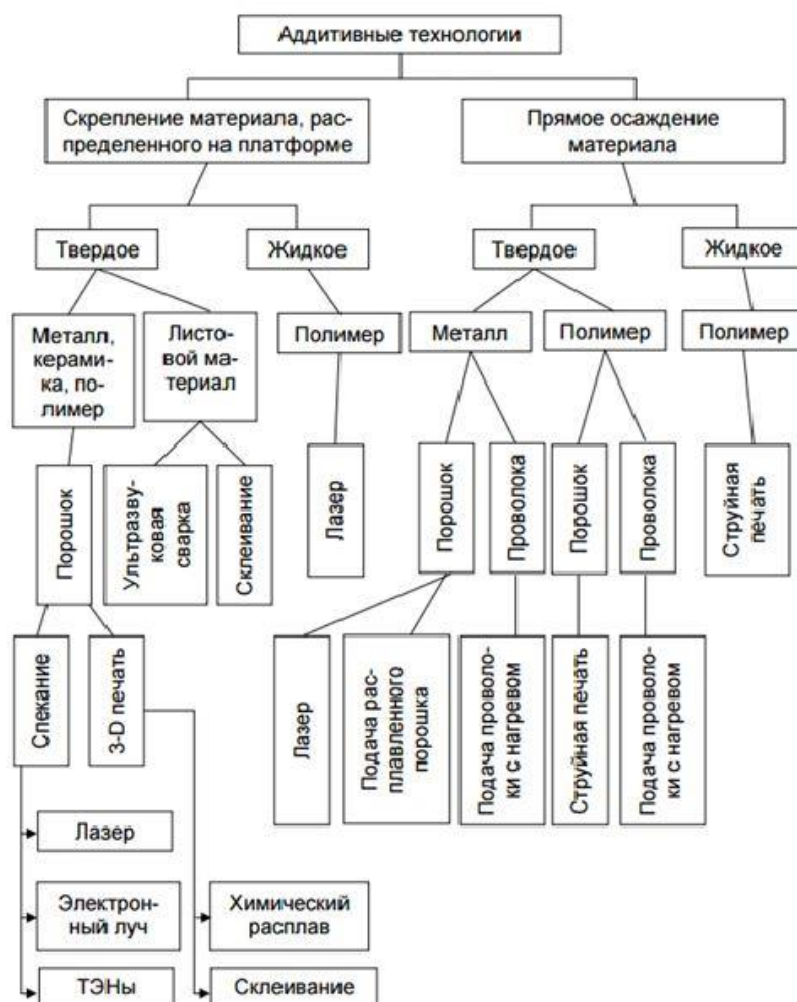


Рисунок 1.4 - Классификация аддитивных технологий с учетом физического состояния и механизма нанесения материала в процессе формирования детали

1.4. Основы автоматизации процесса послойного создания изделия

Сущность большинства применяемых технологий «прямого выращивания» заключается в быстром переводе тонкого слоя жидкого или плавкого порошкообразного сырья в твердое состояние и послойном синтезе изделия. Такой перевод осуществляется обычно лазерным излучением или плазменными потоками, при этом движение луча или концентрированного потока управляется по программе. В качестве сырья в настоящее время при послойном синтезе широко используются металлические порошки и порошки керамики с металлическими связующими.

Изучение сущности и особенностей методов получения деталей машин без формообразующей оснастки, сравнение их преимуществ и недостатков, определение областей рационального применения синтезируемых изделий позволили классифицировать процессы оперативного макетирования и производства и выделить основные направления развития методов послойного синтеза деталей машин.

Традиционные технологии послойного синтеза деталей реализуются только для определенных материалов и формируют плоские поверхностные слои. Перспективным представляется использование новых конструкционных материалов, в том числе композиционных, слоистых, с формируемым градиентом свойств. Это требует применения новых технологий формообразования слоев и сборки изделий, использующих для изменения свойств материала различные концентрированные источники энергии, что в свою очередь ставит задачи распределения потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но по глубине слоя.

В результате при проектировании технологий послойного синтеза с сопутствующей сборкой изделий применяются как технологии получения деталей из конструкционных материалов, использующие концентрированные потоки энергии, так и методы автоматизации процессов быстрого прототипирования и производства изделий.

Различия в автоматизации процессов послойного синтеза изделий определяются применяемыми рабочими органами установок для обработки, транспортировки и контроля. Для технологий, использующих концентрированные потоки энергии, алгоритмы построения изделия зависят от рабочего цикла процесса, последующей сборки и окончательной обработки изделий.

Исследование технологий обработки слоев концентрированными потоками энергии и сопутствующей сборкой изделий показало:

1) процессы оперативного макетирования и производства требуют разработки как интенсивных технологий получения масштабных макетов, легко разрушаемых прототипов, деталей машин и конструкций, так и информационных технологий их моделирования;

2) перспективными являются процессы прямого создания не только геометрической формы изделия, но и его композиционного материала путем последовательного формирования различных слоев и управления их свойствами с сопутствующей сборкой изделия;

3) информационные технологии должны моделировать не только изделие и процесс его получения, но и структуру композиционного материала совместно с процессом его послойного синтеза.

Анализ сущности и особенностей традиционных методов получения изделий без формообразующей оснастки стереолитографией (Stereolithography Application - SLA), послойным формированием моделей из листового материала (Laminated Object Manufacturing - LOM), селективным лазерным спеканием (Selective Laser Sintering - SLS), послойной заливкой экструдированным расплавом (Fused Deposition Modeling - FDM) и другими процессами позволил рассмотреть частные и выделить общие принципы построения технологий послойного синтеза (рис. 1.5).

Так, для *SLA-процесса* рабочий цикл состоит из следующих переходов:

- 1) опускания платформы с моделью в ванну с жидким фотополимером;
- 2) выравнивания толщины пленки на поверхности модели или платформы;
- 3) отверждения слоя сфокусированным ультрафиолетовым излучением;

- 4) повторения рабочего цикла до обработки последнего слоя;
- 5) подъема платформы и извлечения модели.

Для *LOM-процесса* цикл включает:

- 1) раскатывание листового материала заготовки;
- 2) разравнивание листового материала нагретым валиком;
- 3) раскрой лазерным лучом листового материала;
- 4) повторение рабочего цикла до обработки последнего слоя;
- 5) сварку, спекание, склеивание слоев.

В *SLS-процессе* цикл содержит следующие переходы:

- 1) создание тонкого слоя из порошкового материала на рабочем столе;
- 2) разравнивание слоя порошкового материала разогретым валиком;
- 3) обработку лазером слоя порошка в текущем сечении материала;
- 4) повторение рабочего цикла до обработки последнего слоя;
- 5) удаление детали из зоны обработки;
- 6) стряхивание свободного порошка.

При *FDM-процессе* рабочий цикл имеет:

- 1) подогрев материала в экструзионной головке до температуры плавления;
- 2) дозированную подачу разогретого материала в зону обработки;
- 3) нанесение материала на предыдущий слой или на подложку.

При обработке последнего слоя у всех методов рабочий цикл заканчивается.

Для повышения качества поверхности формируемого изделия и снижения длительности процессов прототипирования и производства (LOM, FDM, SLA, SLS и др.) предложены алгоритмы рационального разбиения на слои, с учетом оценки качества поверхности изделия сложной формы (рис. 1.6). При сравнении алгоритмов различных методов послойного синтеза и сборки возможен выбор наиболее рациональных процессов макетирования и производства конкретного изделия.

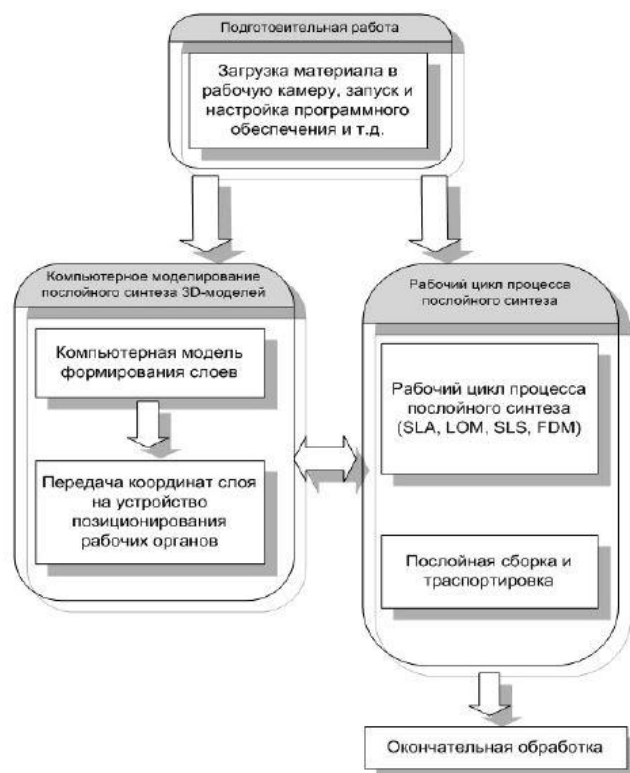


Рисунок 1.5 - Основные этапы методов послойного синтеза изделий



Рисунок 1.6 - Блок-схема алгоритмов разбиения на слои и сборки изделия

Схема алгоритмов разбиения на слои и сборки изделия состоит из 7 блоков:

1. Компьютерная модель изделия, включающая его геометрическое описание, определение критериев оптимальности конструкции путем выявления

«мертвых» зон для формообразующих потоков энергии или вещества, в которых достижение требуемых параметров качества проблематично, и поэтому необходимо изменение элементов конструкций.

2. Выделение слоя максимальной возможной толщины h_{\max} с проверкой и корректировкой слоя, если он является последним. В LOM- и FDM-процессах используется разбивка на слои одинаковой толщины в зависимости от толщины листового материала (LOM) или размеров отверстия сопла и удельного расхода разогретого материала на подачу экструзионной головки (FDM). При этом в LOM-процессе для слоев одинаковой толщины используются разные углы наклона кромок, вписанных в геометрический профиль, а в FDM-процессе разные углы наклона сопла экструзионной головки (рис. 1.7, а). При использовании SLA- и SLS-процессов, а также FDM-процесса - толщина может быть неравномерна для различных слоев (рис. 1.7, б). Разбивка компьютерной модели изделия на слои непосредственно влияет на геометрические параметры качества поверхности (R_{\max} , R_z , R_a и др.).

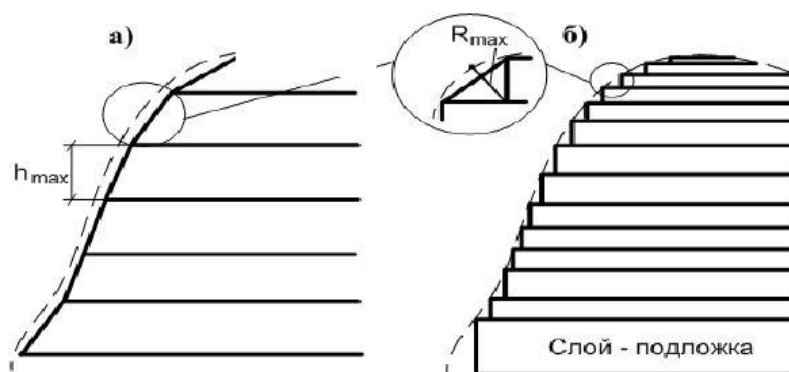


Рисунок 1.7 - Схема разбиения изделия на слои: для LOM- и FDM-процессов (а); для SLA- и SLS-процессов (б)

3. Оценка рельефа поверхности R_{\max} по периметру слоя осуществляется путем проверки геометрических параметров качества, получаемых в текущем слое (рис. 1.7). При неудовлетворительной оценке процесс корректируется.

4. Корректировка путем изменения толщины слоя с использованием коэффициентов понижения α производится при недопустимых параметрах рельефа

поверхности (например: $\alpha = 0,7 \dots 0,9$ для SLA- и SLS-процессов; $\alpha = \sqrt[3]{4}, \sqrt[1]{2}, \sqrt[1]{4}, \dots$ - для LOM- и FDM-процессов).

5. Присоединение слоя к предыдущему или подложке сопровождается проверкой сцепления текущего слоя с предыдущим по размеру площади перекрытия слоев, а также по размеру реальной поверхности контакта (например, для пористых материалов).

6. Проверка завершения синтеза изделия заканчивает цикл послойного «выращивания» и подсчитывает общее количество слоев изделия.

7. Верификация модели - завершающий этап компьютерного сопоставления «выращенной» модели с исходной.

Расчет общего количества слоев (блок 6) позволяет оценить эффективность процесса, выбираемого для послойного синтеза изделия заданной формы одним из предлагаемых методов (LOM, FDM, SLA, SLS и др.).

Верификация модели полученной послойным синтезом (блок 7) дает возможность проверить удовлетворение требований к геометрическим параметрам качества сложнопрофильных поверхностей, заложенных в компьютерную модель изделия (блок 1).

Регулирование толщины слоя (блок 4) и угла «разделки» его кромок (блок 2) позволяет управлять геометрическими параметрами качества сложнопрофильной поверхности (блок 3) и вносить корректировки в начальный выбор методов оперативного макетирования и производства.

Проверка сцепления слоев изделия, в ряде случаев связана с использованием различных материалов для соседних слоев, и требует помимо определения площади их перекрытия (блок 5), также анализа рельефа плоской или сложнопрофильной поверхности.

1.5. Обобщенная схема операций при послойном создании изделия

Аддитивное производство подразумевает, что основными принципами технологии является генерация модели средствами трехмерных САПР и последующее прямое создание изделия. Технология аддитивного производства значительно упрощает процесс производства сложных трехмерных объектов по компьютерным данным. Традиционные процессы производства требуют детального анализа геометрии изделия, определения порядка (последовательности) производства его частей, а главное, подготовительной оснастки и пр. Напротив, аддитивное производство нужны только основные данные о геометрии изделия и понимание того, как работает машина для быстрого прототипирования и какие материалы будут использованы.

Знание о том, как функционирует АП, имеет в виду описание последовательности этапов создания изделия, включая следующие принципиальные вопросы: как добавляется материал в слои, как каждое сечение изделия может быть получено на основе компьютерных данных об изделии и т. п. Обычно в физическом мире каждый слой должен иметь конечную толщину, так что результат должен соответствовать оригинальным данным. Чем тоньше слои, тем ближе изделие к оригиналу. Точность воспроизведения конечной детали, свойства материала, из которого она сделана, будут определять механические и эксплуатационные свойства изделия. Толщина слоев влияет на скорость производства детали и то, потребуются ли так называемые постпроцессы. Размер рабочего объема машины для быстрого прототипирования влияет на количество деталей, которые можно создать одновременно, а все вышеперечисленное влияет на конечную стоимость изделия и процесса.

Обобщенный процесс аддитивного производства включает:

1.5.1. Трехмерное моделирование средствами САПР

Изначально должен быть выбран пакет САПР, в котором разрабатываемое трехмерное изделие будет смоделировано. Конструктор может использовать примитивы, существующие в указанных САПР, либо чертить изделие с нуля. Однако на выходе должен быть создан CAD-файл STL-формата (от

STereoLithography — названия первого коммерчески успешного метода быстрого прототипирования). STL-файл описывает изделие в понятной машине форме.

1.5.2. Конвертация данных и их передача

Различные пакеты CAD используют разные алгоритмы для того, чтобы представить твердые предметы. Для того чтобы установить последовательность и единообразие, формат STL-файла был принят в качестве стандарта в индустрии быстрого прототипирования. В STL-формате данные о трехмерном объекте и форме его трехмерной поверхности представляются как агрегат плоскостных треугольников и содержат координаты вершин и вектора нормали к их поверхности. Так как STL-формат использует плоскостные элементы, он не может представить криволинейные поверхности точно. С увеличением числа треугольников улучшается точность воспроизведения, но при этом увеличивается размер файла данных. Большие сложные массивы данных требуют больше времени для предварительной обработки и построения, поэтому конструктор должен сбалансировать точность будущего изделия с управляемостью данных о нем, для того чтобы STL-архив оставался работоспособным. Поскольку STL-формат общепризнан, процесс работы с ним идентичен для всех методов быстрого прототипирования.

Конвертация данных и их передача в машинный блок установки для быстрого прототипирования подразумевают также процесс разделения на слои STL-данных об изделии. На этом шаг предварительной подготовки STL-архива данных об трехмерном изделии должен быть представлен в виде отдельных слоев. Существует несколько программ, позволяющих потребителю отрегулировать размер, положение и ориентацию модели.

Ориентация при построении (выращивании) изделия важна по нескольким причинам. Во-первых, свойства прототипов могут изменяться от одного направления к другому. Например, обычно прототипы в вертикальном направлении Z менее точны и не так устойчивы, как в плоскости X- Y. Во-вторых, ориентация изделия часто обуславливает количество времени, необходимое для построения модели. Если рабочее пространство машины для быстрого

прототипирования достаточно для выращивания сразу нескольких изделий, разумно расположить их в камере для выращивания так, чтобы одновременно создать максимальное количество моделей. Устанавливая самый короткий размер в направлении Z, можно уменьшить число слоев и таким образом сократить время построения. Средства предпроцессингового программирования могут «нарезать» слои STL-модели толщиной от 0,01 до 0,7 мм в зависимости от метода построения. Программа может также воспроизвести вспомогательную структуру, для того чтобы поддержать модель во время ее выращивания. Каждый производитель машин для быстрого прототипирования разрабатывает и предоставляет собственные средства программирования для предпроцессирования, что усложняет ход согласования данных, если возникает необходимость воссоздать (повторить) изделие на другой машине (в другом процессе быстрого прототипирования).

1.5.3. Проверка и подготовка установки к работе

После запуска и подготовки машины быстрого прототипирования к работе в ней надо установить параметры источника энергии. Следует также выбрать и загрузить исходный материал, предусмотреть связанные с ним условия работы (связи, допуски, поддержки), указать толщину слоя приращения, выбрать место изготовления в рабочей камере, установить времена задержки и пр.

1.5.4. Послойное построение изделия

На этом шаге будет фактически выращена конструкция изделия. Используя разные подходы (возможно, сразу несколько методик), машины быстрого прототипирования слой за слоем строят (или удаляют!) изделие из полимеров, керамики, металла, бумаги, порошкового материала и т. п. Большинство машин могут работать практически автономно. Время от времени требуется мониторинг работы машины, чтобы гарантировать отсутствие ошибок при синтезе изделия, энергетических или программных сбоев.

1.5.5. Удаление поддержек и другие постпроцессы

После завершения синтеза деталь должна быть извлечена из рабочего объема установки. Возможно, это потребует осторожного понижения температуры в ней до температуры окружающей среды. Некоторым фоточувствительным материалам

нужна полная дополнительная засветка готового изделия для окончательного его отверждения. Прототипы могут требовать также небольшой чистки, удаления поддержек и поверхностного покрытия. Зашкурить, герметизировать и/или покрасить модель, чтобы улучшить ее потребительские свойства, — это традиционные пост-процессинговые операции. Изделие готово к использованию. Возможно, потребуется операция сборки отдельно выращенных деталей.

На рис. 1.8 показана обобщенная управляющая программа работы с STL-файлом, где содержатся сведения обо всех сечениях данной модели, всех ее составных частях (здесь может быть использовано несколько файлов), допустимых отклонениях по уровню на один слой порошковой композиции при опускании платформы.

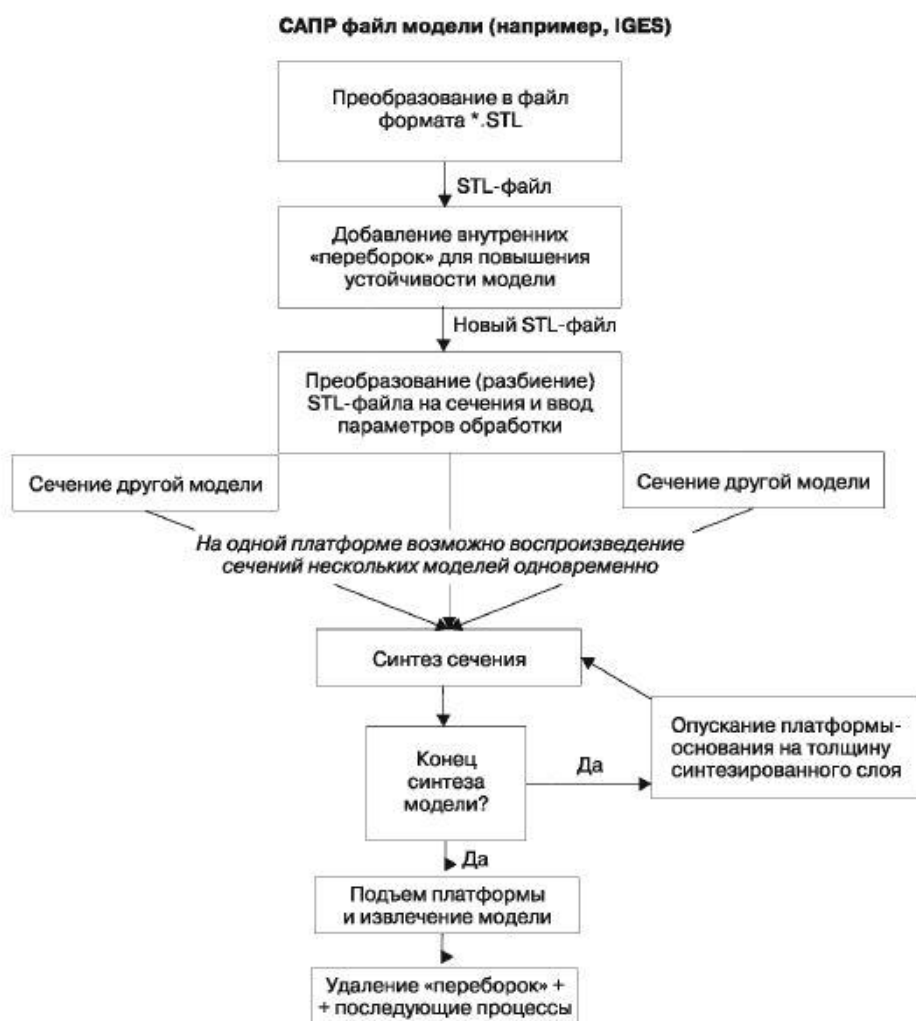


Рисунок 1.8 - Блок-схема управляющей программы обработки с STL-файлом

1.6. Специфика работы на разных аддитивных установках

Разработчики систем быстрого прототипирования в последнее время ориентируются на выпуск недорогих и быстродействующих машин, снижая стоимость и увеличивая объем рабочей камеры.

Область применения быстрого прототипирования определяется достижимой точностью изготовления детали и механическими свойствами используемого материала — растяжимостью, твердостью и прочностью на разрыв.

Рассмотрим классификацию оборудования для быстрого прототипирования по уровню применяемости.

Потребительский уровень. Тип принтеров, который предназначен, в основном, для личного использования. Поставляется в виде конструктора, либо в сборе. Так как платформа у них, в основном, одна и та же, их характеристики тоже весьма схожи.

Данные принтеры оборудованы простым и понятным интерфейсом, печатают, как правило, ABS и PLA пластиком и предназначены для печати изделий средней сложности и точности.

Персональный уровень. Пограничный класс принтеров, который является домашним, но в то же время относится к нижней ступени промышленных принтеров для бизнеса. Данные принтеры обладают более высоким качеством и точностью печати, которые присущи профессиональным 3D-принтерам.

Работа с принтерами этого класса сводится к загрузке образа и нажатию кнопки «пуск». В то же время это ограничивает возможности в плане различных дополнительных параметров печати. Персональные принтеры пригодны для использования в офисах, однако шумность и высокий температурный режим некоторых моделей предполагает их размещение на некотором удалении от рабочей зоны.

Профессиональный. Системы этого класса включают в себя все достижения и возможности доступные индустрии. Предназначение профессиональных систем может быть очень разным, от прототипирования до полномасштабного

производства, что в свою очередь делает их отличным вариантом как для крупного бизнеса, так и для высокотехнологичных компаний с малым штатом сотрудников.

Данные принтеры, ввиду большого количества режимов и дополнительных опций, уже требуют определенных навыков для работы с ними, поэтому без оператора здесь не обойтись. По части рабочего пространства профессиональные 3D-принтеры требуют отдельного помещения с хорошей вентиляцией и с подведенной высоковольтной линией. Профессиональные 3D-принтеры предназначены для печати изделий высокого качества и точности.

Производственный. Машины данного класса являются совокупностью точности и качества профессиональных принтеров, большой площадью печати, высокого уровня автоматизации и контроля процессов. На них, как и на профессиональных установках, можно печатать не только прототипы, но и конечный потребительский продукт.

Для работы на производственных 3D-принтерах необходимы опытные операторы. По части рабочего пространства нужно четко спланировать будущую линию и позаботиться о подводе высоковольтной линии и газовой трубы. На выходе получится высокотехнологичное производство, которое может быстро менять профиль и использовать материалы от ABS пластика до титана.

3D-ручка. 3D-ручка есть не что иное, как ручной экструдер. В роли ЧПУ станка выступает сам пользователь. Основные элементы 3D-ручки: сопло, механизм подачи пластиковой нити, нагревательный элемент, вентилятор для охлаждения верхней части сопла и ручки в целом, микроконтроллер для управления работой вентилятора, механизма подачи и нагревательного элемента. Так как практически все программные функции 3D-принтеров выполняет сам пользователь, 3D-ручки не требуют соединения с компьютером или создания цифровых моделей. Требуется лишь электропитание - как правило, используются обычные блоки питания с преобразователем напряжения 12В. Как и в FDM-принтерах, нагрев сопла занимает несколько минут, после чего ручка готова к печати. Подача материала осуществляется при нажатии соответствующей кнопки. Некоторые модели, оснащаются регулятором скорости печати.

1.7. Пути повышения точности воспроизведения моделей и качества поверхности

Технология, предполагающая послойный принцип построения детали, обеспечивает определенный уровень качества поверхности модели, основным критерием обычно является чистота поверхности. Машина строит модель послойно согласно созданным перед началом построения «сечениям». После завершения построения модель имеет ступенчатую поверхность, а высота ступеньки соответствует шагу построения. Например, при построении модели шара: на полюсе он будет иметь плоскую площадку, шероховатость на участке, близком к полюсу будет максимальной, но, чем ближе к экватору, тем лучше будет качество поверхности (рис. 1.9).

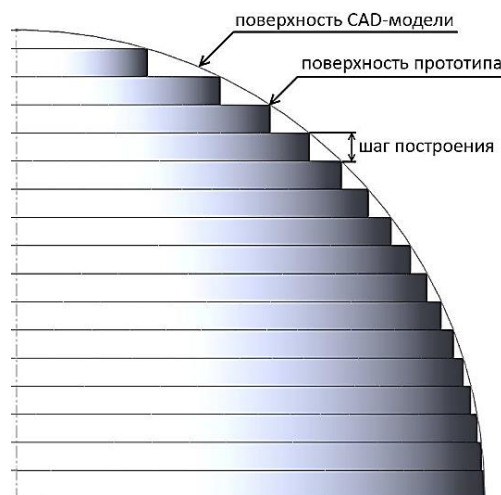


Рисунок 1.9 - Послойный принцип построения модели

Качество поверхности прототипа часто зависит от ориентации модели на рабочей платформе при построении. При построении плоской детали, расположив её горизонтально, можно получить низкую шероховатость горизонтальной поверхности; для получения лучшего качества на боковых поверхностях модель необходимо сориентировать под углом к плоскости платформы.

Важным параметром, определяющим качество поверхности, является качество исходной трёхмерной CAD-модели. Виртуальная модель представляет собой 3D-поверхность в виде замкнутой сетки из треугольников. Шероховатость поверхности напрямую зависит от качества создания сетки (рис. 1.10).

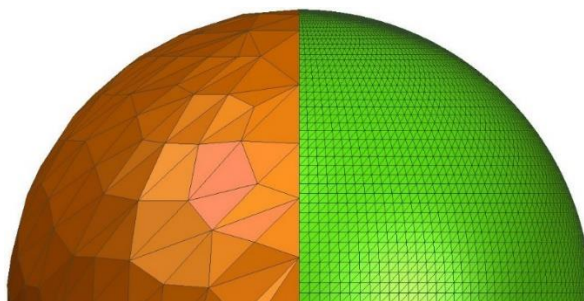
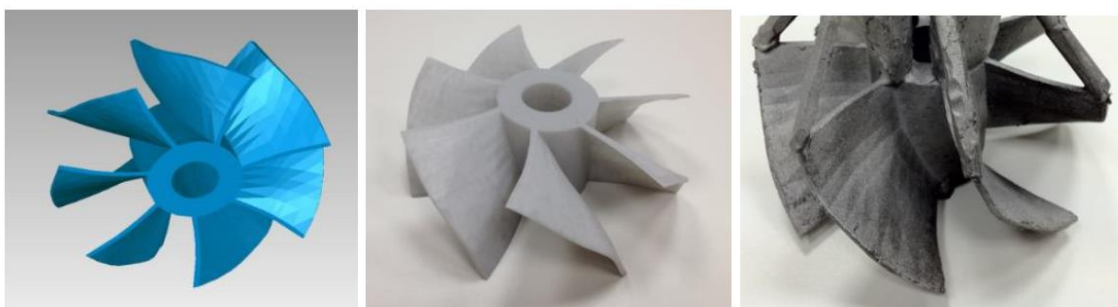


Рисунок 1.10 - Модель шара: слева – низкого качества, справа – высокого

Так, при использовании трёхмерной модели низкого качества макрошероховатость, заложенная в файле, может проявиться при построении физической модели и дать ложное представление о качестве принтера или эффективности выбранной технологии (рис. 1.11).



CAD-модель

SLA-модель

Отливка, сталь

Рисунок 1.11 - Низкое качество CAD-модели обуславливает низкое качество поверхности отливки

Во многих случаях большая или меньшая шероховатость не имеет принципиального значения для потребителя. При необходимости поверхность модели можно улучшить посредством ручной обработки (шлифовки, полировки, окраски, лакировки). Но в ряде случаев это технически затруднительно или может привести к потере точности (геометрии) модели.

Технологии SLS, DLP, Poly-Jet и др., использующие жидкий фотополимер в качестве модельного материала, предполагают наличие так называемых поддерживающих структур – поддержек, на которых закрепляется тело модели при построении (рис. 1.12). Эти поддержки строятся автоматически по специальной

программе и представляют собой тонкие столбики. В зависимости от технологии они строятся из специального легкорастворимого в воде материала (по технологии Poly-Jet компании Objet) или из основного модельного материала (классическая лазерная стереолитография – SLA). После построения поддержки удаляются механически (SLA) или смываются водой (технология Poly-Jet), поэтому одна из поверхностей модели более шероховатая, чем остальные.

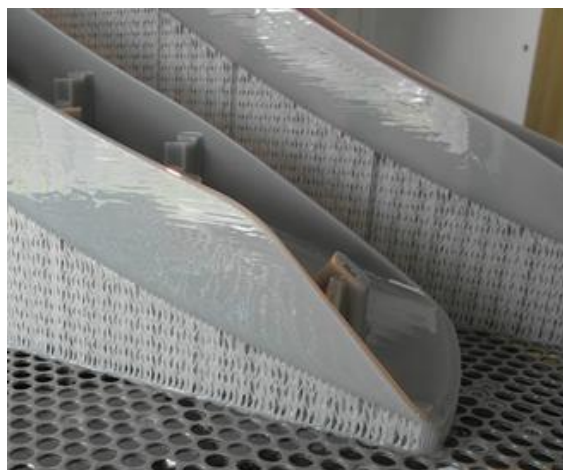


Рисунок 1.12 - SLA-модель с поддерживающими структурами

Качество построенной модели зависит также и от квалификации персонала: насколько правильно была сориентирована модель на рабочей платформе перед построением, насколько верно был выбран режим генерации поддерживающих структур, насколько качественно был сделан исходный 3D-файл.

В качестве примера в таблице 1.1 приведены результаты сравнительных измерений поверхностей одной и той же детали, построенной на разных машинах. Для большей достоверности измерения проводились на горизонтальных (тип А) и вертикальных (тип В) поверхностях. Измерения только одного вида поверхности может привести к неверному представлению о возможностях машины, поскольку, например, машина, работающая с жидким фотополимером, может построить очень гладкую, почти зеркальную горизонтальную плоскость, но на вертикальной стенке может быть заметная шероховатость.

Таблица 1.1 - Сравнение шероховатостей моделей, полученных различными аддитивными технологиям

Технология	Аддитивная машина	Материал	Профилометр							
			Mahr MarSurf PS1				Zeiss O-inspect 01-422			
			R _a		R _z		R _a		R _z	
			Тип А	Тип В	Тип А	Тип В	Тип А	Тип В	Тип А	Тип В
SLA	Viper Pro 8000	AccuraXtreme	0,08	3,18	0,31	18,5	0,03	3,8	0,54	7,02
		Accura 60	0,13	2,82	0,66	13,9	0,19	2,4	0,5	4,42
		Accura 55	0,1	1,35	0,63	13	0,15	0,4	0,42	4,14
		Accura SI10	1,32	5,17	9,7	7,9	1,93	4,4	7,4	23,2
SLS	Sinterstation HiQ	Dura form PA	10	12,47	50,6	61,7	4,24	7,55	17,1	41,1
		Duraform GF	10,39	9,46	67	51,6	6,36	6,51	30,3	22,7
SLM	SLM 280	AlSi10 Mg	8,12	8,63	43,3	39,1	10,76	3,55	39,2	14,2
DLP	Ultra	SI500	0,53	0,55	3,87	2,26	1,44	1,36	5,4	6,6
Ink-Jet	Invision XT	Visi Jet EX200	2,55	9,38	11,9	46,1	0,91	6,12	3,7	19,5
LOM	SD300	PVC	0,06	5,25	0,52	24,9	0,06	5,25	0,41	4,14

Из приведенных данных, очевидно, что и внутри отдельной технологии могут быть существенные нюансы в оценке шероховатости, связанные с типом модельного материала (его качеством и, соответственно, ценой!). Видно также, что технологии, базирующиеся на использовании жидких фотополимеров (SLA, DLP), позволяют получить более гладкие поверхности по сравнению с SLS или FDM-технологиями.

То же касается и точности: чем выше точность построения, тем дороже 3D-принтер. По этому параметру аддитивные машины имеют значительные отличия. При рассмотрении технических характеристик принтеров, безусловно, следует обращать внимание на параметр, называемый layers thickness – толщина слоя построения, или шаг построения.

На точность влияет ряд параметров, и шаг построения является не единственным и, зачастую, не главным. Заявляемый шаг построения, например, 0,08 мм для SLS-машины вовсе не означает, что модель размерами 250x250x250 мм будет построена с отклонениями по осям измерений $\pm 0,08$ мм. Скорее всего, отклонения будут находиться в пределах нескольких десятых долей миллиметра ($\pm 0,3...0,8$ мм). На конечный результат будет сильно влиять тип материала (полиамид, полистирол) и в ещё большей степени – конфигурация модели, а также квалификация персонала: правильно ли выбраны режимы спекания, ориентация

моделей в объеме построения, расположение моделей относительно друг друга и т. д. При этом нужно помнить, что SLS – это тепловой процесс, в ходе которого в рабочую камеру подводится значительное количество тепла, температура массива в камере достигает 150°C. Естественно, что строящаяся модель подвергается существенным тепловым нагрузкам и может деформироваться.

Данный эффект может быть усилен или ослаблен действиями персонала как на стадии подготовки задания на построение, так и в процессе работы машины и извлечения моделей из камеры. Неверные действия могут привести к короблению модели, и формальная точность, выраженная понятием *layers thickness*, не будет иметь никакого значения: отклонения от исходной геометрии могут составлять миллиметры.

Другие технологии также имеют свои особенности, например, разную реальную точность построения по осям: в плоскости X-Y одно значение, в направлении Z – другое. Поэтому при выборе технологии и 3D-принтера не лишним будет построить тестовые модели на разных АМ-машинах, провести измерения и оценить, соответствуют ли результаты ожиданиям заказчика и требованиям к модели для конкретных задач. Тем не менее, общепринятым можно считать мнение, что наилучшая точность построения достигается в SLA-машинах. Одной из причин этого является то, что в SLA-технологии процесс построения происходит при комнатной температуре в отсутствии термических нагрузок. Большое значение имеет также качество модельных материалов. Современные SLA-материалы, во-первых, малоусадочные и, во-вторых, имеют определенную вязкость, позволяющую получать стабильно в процессе построения тонкие слои до 0,025 мм. Реальная точность построения SLA-машин составляет 0,025...0,05 мм на дюйм линейного размера. Это значит, что модель с характерным размером 250 мм будет, иметь отклонения в пределах $\pm 0,25 \dots 0,5$ мм. Однако эти отклонения могут быть существенно уменьшены за счет введения соответствующих корректировочных коэффициентов на стадии подготовки задания на построение, и следующая модель может быть построена значительно точнее, правда, в этом случае первая модель будет в качестве тестовой.

1.8. Тесты производительности и контроля

Обычно сравнение методик быстрого прототипирования проводят, взяв за отправную точку возможности стереолитографии. Она дает точность -100 мкм (0,004 дюйма) при размерах детали до 15 см. Порошковые методики и LOM обычно имеют точность меньше указанной. В струйных методиках БП ситуация на порядок лучше. Но тут важно знать не только геометрию изделия (его размеры), но и используемый материал, а также метод оценки точности и производительности.

Для анализа методик быстрого прототипирования по времени и стоимости был изготовлен разными методами перепускной клапан диаметром 15 см, сравнительные параметры изготовления которого занесены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 - Сравнение методик быстрого прототипирования по времени и стоимости

Параметр	Технология					
	MJM	FDM	3DP	SLS	LOM	SLA
Материал	Воск	АБС-пластик	Гипс	Полистирол	Бумага	Эпоксидный фото-полимер
Точность в сравнении с CAD, дюймов	0,013	0,014	0,025	0,018	0,010	0,006
Время синтеза	7 ч 17 мин	42 ч 10 мин	5 ч 40 мин	6 ч 51 мин	19 ч 39 мин	26 ч 19 мин
Стоимость клапана, \$	146,0	421,6	113,2	268,0	393,2	789,9

На основании таблицы можно проследить закономерность: увеличение точности воспроизведения приводит к увеличению стоимости и времени изготовления.

1.9. Сравнительная оценка аддитивных установок по размерам рабочей камеры, точности и времени воспроизведения

Сравнение процессов быстрого прототипирования обычно производят по следующим критериям.

Размер детали. Габариты детали, которую может построить система прототипирования, ограничена размерами «строительной камеры». В зависимости от типа машины, ее модификации и метода синтеза размеры моделей. Очевидно, что большие детали могут быть изготовлены по частям и затем собраны в одну деталь.

Скорость. Скорость построения модели зависит от таких факторов, как размер детали, геометрическая сложность, используемые материалы, программное обеспечение и др.

Материалы. Спектр материалов для прототипов, различающихся по степени прочности и качеству образуемой поверхности. В зависимости от процесса в модельном прототипировании используют следующие материалы: полистирол, термопластик, бумага, акрил, поликарбонат, нейлон, ABS, синтетические смолы и др.

Точность. Точность прототипа (степень соответствия CAD-модели) зависит от ряда факторов:

- правильности построения CAD-файлов;
- продуманной системы поддержек;
- разрешения (толщины слоев);
- выбора методики синтеза;
- свойств исходного материала.

Смолы, например, имеют свойство коробиться или усаживаться при высыхании. Другие материалы не обеспечивают качества поверхности модели, достаточного для дальнейшего ее использования (при изготовлении литьевых форм), или достаточной прочности.

Стоимость. Стоимость некоторых установок довольно высока. Однако они за короткое время окупаются, так как функциональность изготавливаемых прототипов велика.

В табл. 1.3 проиллюстрировано сравнение по времени, точности и размерам рабочих камер для изготовления изделий размером 0,76...14 см различными методами БП.

Таблица 1.3 - Сравнение методик аддитивного производства по времени и точности воспроизведения

Методика*	Точность, мм	Максимальный размер изделия, мм**	Время процесса
Заливка экструдруемым расплавом (FDM)	0,005	254 x 254 x 254 (Stratasys)	12 ч 39 мин
Процесс листового ламинирования (LOM)	0,010	812x558x508 (Cubic Technologies)	11 ч 02 мин
Селективное лазерное спекание (SLS)	0,005	381 x 330x457 (3D Systems)	4 ч 55 мин
Процесс отверждения на основании (SGC)	0,006	508 x 355 x 508 (Cubital)	11 ч 21 мин
Стереолитография (SLA)	0,003	990 x 787 x 508 (Sony)	7 ч 03 мин
3D-печать (RepRap)	0,100	240 x 240 x 240 (Fab@Home)	Не определено

*В скобках приводится английское сокращение. **В скобках указан производитель.

1.10. Применение аддитивных технологий в различных отраслях промышленности, в образовании, сфере услуг, медицине

Авиационно-космическая промышленность. Авиационно-космическая промышленность по самой своей природе этот рынок требует мелкосерийного производства высококачественных деталей, поэтому избавление от инструментальной оснастки, предлагаемое аддитивными технологиями, приносит существенные выгоды.

В настоящее время ряд систем и материалов прошли сертификацию, и сегодня аддитивные технологии используются для мелкосерийного производства деталей летательных аппаратов. Так, например, компания General Electric (GE) производит топливные форсунки для нового турбовинтового двигателя LEAP с помощью процесса DMLS из кобальтохромового порошка. Впервые 3D печать используется для массового производства различных деталей, необходимых для тысячи реактивных двигателей (рис. 1.13).

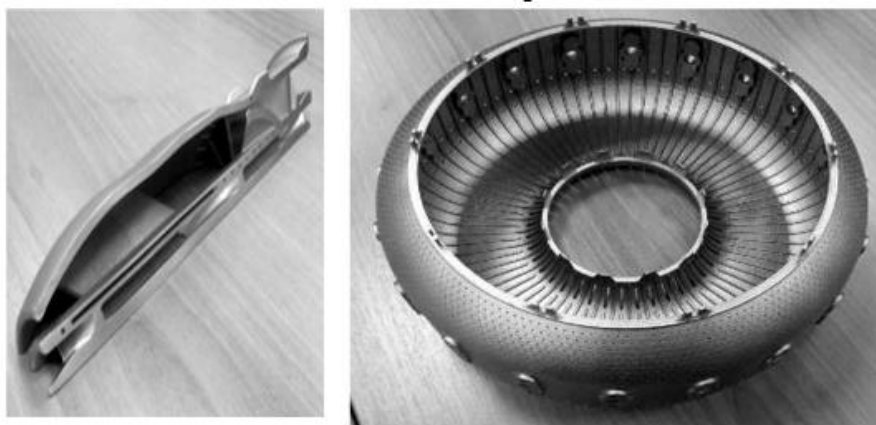


Рисунок 1.13 - Детали авиационного двигателя, полученные промышленным методом с помощью селективного лазерного сплавления

Компания Airbus использовала технологию селективного лазерного плавления для уменьшения массы шарнирного крепления, применив в его конструкции легковесные и прочные решётчатые конструкции (рис. 1.14).

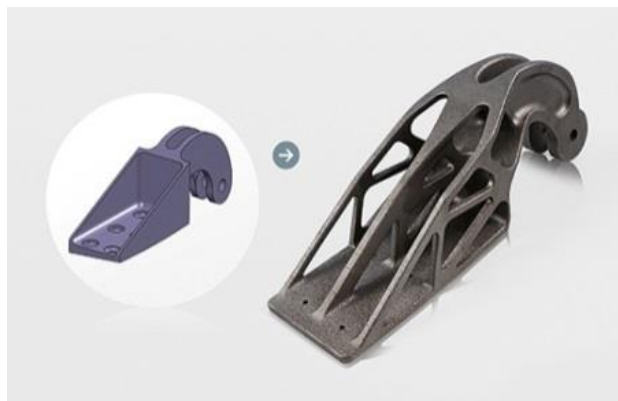


Рисунок 1.14 - Шарнирное крепление до и после оптимизации конструкции под аддитивное производство

В табл. 1.4 показано преимущества внедрения аддитивных технологий на примере производства кронштейнов компанией Airbus Defence and Space.

Таблица 1.4 - Преимущества аддитивных технологий

Экономия	Применение аддитивных технологий
Трудоемкость работ Расходы на производство	Технология позволяет сократить время изготовления 3 деталей до 1 месяца, а время сборки со смежными компонентами — на 5 дней
	Вместо ряда традиционных операций обработки можно создавать деталь в одном технологическом действии
	Вес напечатанной детали на 300 г легче традиционной конструкции, что дает почти 1 кг экономии для целого спутника
Издержки при эксплуатации	Напечатанные из порошка титана детали с большей вероятностью сохраняют находящееся на спутнике оборудование от возможных сбояв

SLM-метод широко применяется в двигателестроении инженерами NASA. При помощи SLM установки был произведен и успешно протестирован инжектор двигателя для ракеты RL-10. Испытание инжектора ракетного двигателя (РД) компании Aerojet Rocketdyne совместно с Научно-исследовательским центром NASA им. Гленна (Кливленд) продемонстрировало внушительные результаты в области аддитивных технологий (табл. 1.5).

Таблица 1.5 - Сравнение методик изготовления детали

Параметры	3-D печать методом SLM	Традиционные способы обработки
Срок сдачи детали	3 недели (из них 40 часов на изготовление)	6 месяцев
Количество компонентов детали	1 часть	4 части
Количество спаянных (сварных) соединений	0 спаек	5 спаек
Стоимость детали	5 тыс. долл.	10 тыс. долл.

Российская компания *ОАО «НИАТ НТК»* провела работы по замене сварных топливных форсунок авиационного двигателя на «выращенные» из никелевого сплава *CL 100NB* (рис. 1.15). В результате значительно снижен процент брака, масса изделия уменьшена на 17%.

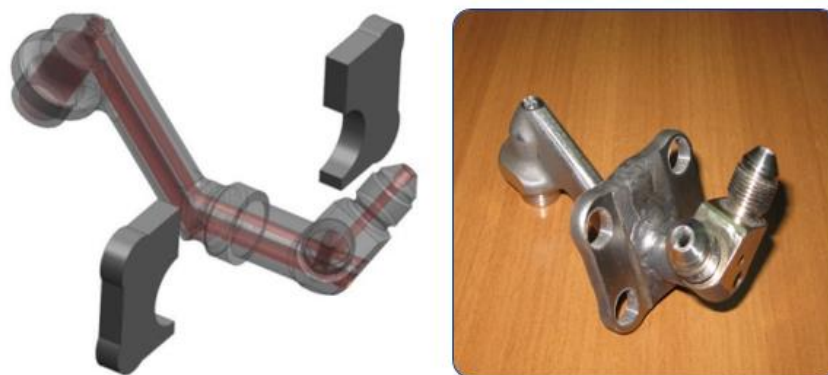


Рисунок 1.15 - Сварная и «выращенная» топливная форсунка

Для ремонта дорогостоящих изделий, например, рабочих органов турбин ГТД, валов (рис. 1.16) и т.д., а также для нанесения защитных и износостойких покрытий, используют такие аддитивные технологии, как *DMD* и *LENS*. Использование стереолитографии позволило на стадии разработки узлов ГДТ уменьшить стоимость экспериментов, сократить общее время проектирования, повысить точность расчетных исследований и резко понизить общее количество запусков установки.

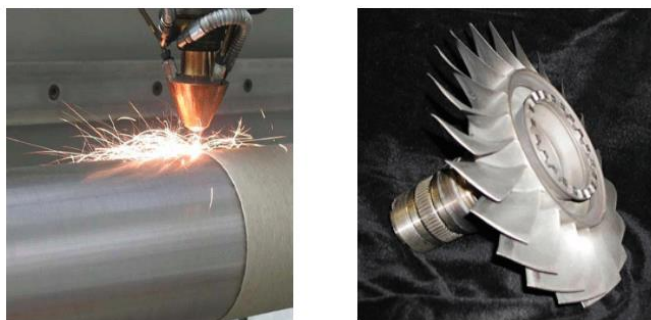


Рисунок 1.16 - Восстановление деталей авиационного двигателя

Специалисты Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ) впервые в России изготовили по аддитивной технологии прототип малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД) для беспилотных летательных аппаратов.

МГТД (рис. 1.17) был изготовлен полностью на базе аддитивного производства ВИАМ по новой технологии послойного лазерного сплавления с использованием металлопорошковых композиций жаропрочного и алюминиевого сплавов, созданными специалистами института. Эта технология позволяет получить деталь в 30 раз быстрее, чем традиционными способами, толщина стенки камеры сгорания этого двигателя составила 0,3 мм.



Рисунок 1.17 - Малоразмерный газотурбинный двигатель

Литейное производство. Для традиционного литейного производства аддитивные технологии дают новые возможности для оптимизации затрат и повышения эффективности производства.

При их использовании отпадает необходимость в дорогостоящей инструментальной оснастке, выдерживающей десятки и сотни тысяч циклов. Например, пресс-форма может быть выращена вместе с каналами охлаждения произвольной конфигурации, что невозможно сделать при обычных методах механообработки. Для изготовления пресс-форм с медными охлаждающими сердечниками, а также с так называемой конформной системой охлаждения, конфигурация которой соответствует геометрии формуемой детали, используют аддитивные машины *POM*, *Omtomec* и *Fabrisonic*. Применение литейных форм с равномерным или регулируемым охлаждением позволяет сократить время пребывания отливки в форме до 30%.

Автомобилестроение.

Концерн BMW изготавливает эргономичные инструменты, детали концептуальных, эксклюзивных или ретро-автомобилей. В 2015 г. BMW оснастил гоночные автомобили DTM водяным насосом с рабочим колесом, изготовленным 3D-печатью (рис. 1.18). Высокоточная деталь из алюминиевого сплава подвергается большим напряжениям и показывает высокую надежность..



Рисунок 1.18 - Деталь насоса

Компании Stratasys и Kor Ecologic напечатали на 3D-принтере рабочий гибридный автомобиль (рис. 1.19). При этом были использованы принтеры Dimension 3D и Fortus 3D, производимые компанией Stratasys.



Рисунок 1.19 - Двухместный автомобиль Urbee Hybrid, созданный при помощи 3D-принтера

Для создания целых автомобилей американская фирма Local Motors (рис. 1.20) использует технологию 3D-печати.



Рисунок 1.20 - Автомобиль Американской фирмы Local Motors

Образование.

Для повышения качества знаний студентами, учреждение среднего профессионального образования Саратовский колледж промышленных технологий и автомобильного сервиса изготовил наглядные пособия сборочных изделий для дисциплины «Конструирование деталей машин» и профессионального модуля «Разработка технологических процессов для сборки узлов и изделий в механосборочном производстве» (рис. 1.21).

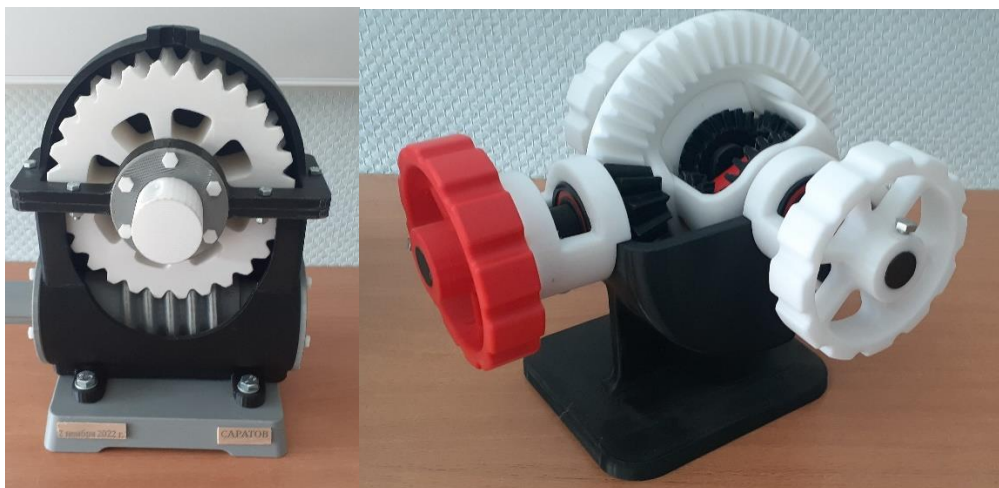


Рисунок 1.21 – Наглядные пособия ГАПОУ СО «СКПТиАС»

Сфера услуг.

Аддитивное производство – экономически оправданное решение для изготовления небольших партий ювелирных украшений. При изготовлении пробных партий для маркетинговых исследований, выставок и показов, при высокой срочности заказов или же в случаях невозможности изготовления изделий традиционным способом. Появление новой цифровой технологии прямого аддитивного производства изделий из металлов, в том числе драгоценных, обеспечивает исключительную свободу дизайна (рис. 1.22). Использование технологии позволяет изготавливать эксклюзивные изделия ранее недоступных форм и дизайнерских решений.

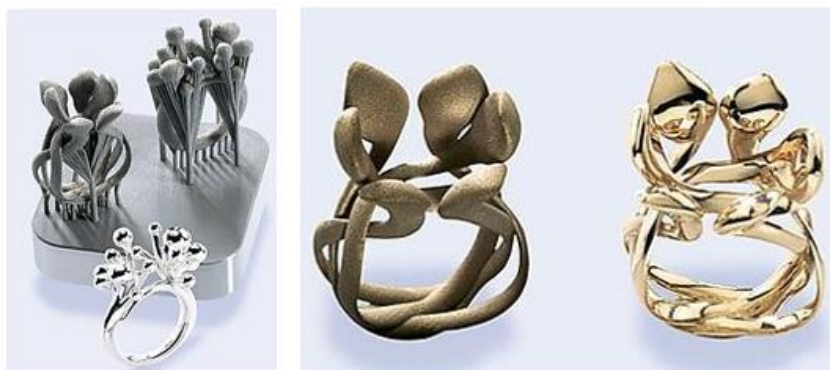


Рисунок 1.22 - Ювелирные украшения, полученные методом селективного лазерного плавления LaserCUSING

Нейлоновый Аэровелосипед (рис. 1.23), созданный Европейским аэрокосмическим и оборонным концерном (European Aerospace and Defence Group (EADS)), обладает рядом преимуществ по сравнению с более традиционными велосипедами: он наполовину легче, но его прочность равна прочности стали. Кроме того, такое производство велосипеда является гораздо более экологически чистым, чем обычный производственный процесс.



Рисунок 1.23 - Аэровелосипед (Airbike)

Компания 3D Systems добилась успехов в области печати пищи, и исследовала возможности использования принтеров для создания целого ряда различных продуктов. Созданный ими аппарат Chefjet, способен создавать шоколадные изделия и конфеты.

Производители создают узкоспециализированные инструменты с помощью 3D принтеров: от обычных гаечных ключей, отвёрток и молотков до инструментов, которые предназначены для работы в очень конкретных обстоятельствах. Так, компания «Stratasys» создала аккумуляторные дрели, которые включают в себя целый ряд различных полимеров.

Медицина. В медицине часто необходимо изготавливать продукцию, персонализированную с точки зрения формы и функций, что обусловлено уникальностью каждого пациента. Технологии аддитивного производства способны сделать производство персонализированной продукции экономически целесообразным при минимальных изменениях в дизайне.

Применение в медицине аддитивных технологий подразделяют на следующие категории:

- биомоделирование, включающее в себя изготовление физических моделей анатомического строения человеческого тела и, говоря шире, биологических структур для хирургического тестирования и планирования операций;
- проектирование и изготовление персонализированных имплантатов для реконструктивных операций, реабилитации и пластической хирургии;
- производство имплантатов с пористой структурой (матриц) и тканевая инженерия; изготовление специализированных хирургических инструментов и приспособлений;
- доставка лекарственных средств и изготовление микронных медицинских устройств.

С помощью EBM-системы Arcam налажено массовое производство ацетабулярных колпачков, применяемых при протезировании тазобедренного сустава. Использование аддитивных технологий позволяет производить имплантаты с пористой структурой, облегчающей прорастание тканей. В работах приводятся результаты экспериментов по изготовлению биоактивных и биосовместимых имплантатов.

Технологии аддитивного производства применяются для серийного производства стоматологических изделий. Для стоматологических изделий очень хорошо подходит процесс SLM, поскольку изделия имеют сложную геометрию, требуют значительной индивидуализации.

Аддитивные технологии находят свое применение также в сфере слухового протезирования: два ведущих производителя слуховых инструментов, Siemens и Phonak, применяют системы аддитивного производства для серийного производства индивидуализированных слуховых аппаратов. В настоящий момент для изготовления слуховых аппаратов используются процессы SLS.

1.11. Дорожная карта развития аддитивных технологий

Приоритетные направления развития аддитивных технологий:

В области моделирования процесса и его контроля:

- разработка многомасштабной системы моделирования «процесс—структура — свойства», интегрированной с инструментами CAD/CAE/CAM;
- создание систем с обратной связью, адаптивного управления с возможностями упреждения и отклика для процессов аддитивного производства. Алгоритмы системы управления должны базироваться на прогнозирующих моделях реакции системы и вариации процессов;

- создание новых сенсоров для диагностики процессов в камере синтеза и разработка (совершенствование) новых методов обработки информации при диагностике.

В области установок и превращения в материалах:

- развитие понимания физики процессов аддитивных технологий для охвата всей совокупности явлений;
- создание масштабируемых скоростных методов линейных и угловых перемещений в процессах обработки материалов с целью увеличения производительности и рабочих объемов машин аддитивного производства;
- использование уникальных возможностей аддитивных технологий для создания эпитаксиальных металлических структур, уникальных структур, возможности врезки готовых (например, датчики, сенсоры) компонентов во время процесса изготовления изделия;
- развитие инструментария для изготовления методами аддитивных технологий структур на уровне «атом за атомом» и конструирования аддитивных нанофабрикаторов;
- определение («зеленых», то есть экологичных) материалов, включая многоразовые, пригодные для переработки и биodeградируемые материалы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что означает термин Быстрое прототипирование?
2. Что означает термин Аддитивное производство?
3. Что означает термин Прототип?
4. Перечислите аспекты, характеризующие прототип.
5. Из каких шагов состоят процессы быстрого прототипирования?
6. По каким методам подразделяют аддитивные технологии?
7. Из каких переходов состоит рабочий цикл SLA-процесса?
8. Из каких переходов состоит рабочий цикл LOM -процесса?
9. Из каких переходов состоит рабочий цикл SLS -процесса?
10. Из каких переходов состоит рабочий цикл FDM -процесса?
11. Опишите обобщенный процесс аддитивного производства.
12. Перечислите основные группы вариантов применения быстрого прототипирования.
13. Перечислите уровни применяемости оборудования для быстрого прототипирования.
14. Перечислите факторы от которых зависит точность прототипа (степень соответствия CAD-модели).
15. По каким критериям производят сравнение процессов быстрого прототипирования?

ТЕМА 2. ТЕХНОЛОГИЯ 3D ПЕЧАТИ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

2.1. Подача пластика в экструдер. Расплавление пластика в экструдере

Экструдер — это машина, которая превращает сырьё в виде мелких частиц в расплав определённой формы. В качестве таких частиц могут использоваться гранулы, порошок, разнообразные пасты или лом.

Процесс экструзии заключается в прохождении сырья через специальный формующий инструмент (экструзионную головку, фильерную пластину). Форму готового продукта задаёт калибрующее устройство с определённым сечением. Она будет зависеть от вида отверстия в формующем устройстве. Если это щель, на выходе получится листовый материал, если кольцо, то изделие будет иметь форму трубы.

Основная функция экструдера 3D принтера - обеспечение равномерного выдавливания расплавленного пластика для формирования слоев 3D модели.

Разделим экструдер на два узла: холодный узел (coldend, колдэнд) (рис. 2.1) и горячий узел (hotend, хотэнд, хотенд).

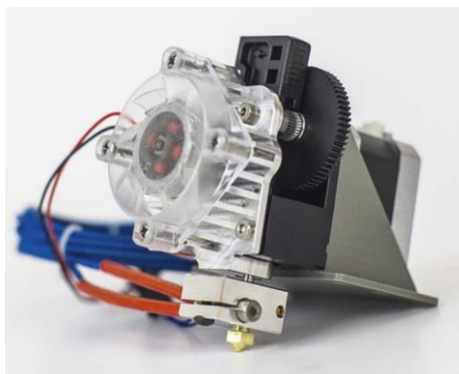


Рисунок 2.1 - Холодный узел экструдера

Холодный узел относится к верхней части экструдера 3D-принтера, в которую подается нить, а затем проходит в хотенд (горячий узел), далее нить плавиться и экструдироваться на платформу 3D принтера.

Экструдера 3D-принтеров в свою очередь подразделяются на два типа Директ (direct, прямой привод) или Боуден (Bowden), от этого зависит конструкция

холодного узла (рис. 2.2). Пример директ экструдера E3D Titan Aero изображен на рис. 2.1.

Холодный узел состоит из двигателя экструдера приводящий в движение зубчатую передачу, которые обычно устанавливаются либо на раме принтера, либо на самой печатающей головке, в зависимости от типа экструдера и трубки из тефлона, которая обязательно нужна любому экструдеру типа Боуден для точного направления пластиковой нити и минимального отклонения в процессе 3D печати и отката нити.

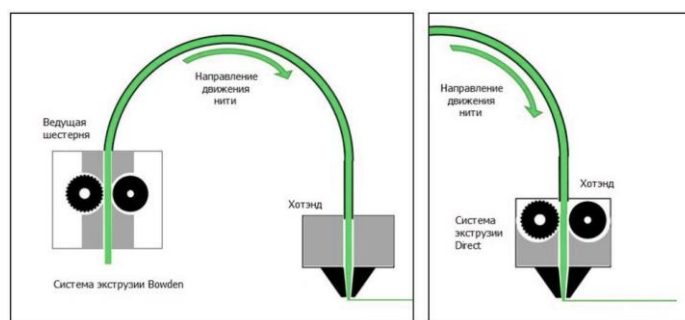


Рисунок 2.2 - Сравнение экструдеров и принцип работы

Директ экструдеры для 3D принтеров отличается размещением двигателя непосредственно над хотэндом (рис. 2.3). Такое расположение сводит к минимуму расстояние от зубчатой передачи до хотэнда и обеспечивает более надежную 3D-печать гибких нитей типа TPU, TPE, SEBS, Flex и т.д.



Рисунок 2.3 - Директ экструдер Prusa i3 Mk3

Наличие директ экструдера не обязательно означает, что он может отлично печатать гибкими нитями. Для успешной печати гибкими материалами необходимо контролировать положение зажима и устройство зубчатой передачи.

Еще одно преимущество использования директ экструдера заключается в более точном управлении втягиванием. Благодаря расположению непосредственно над хотэндом, меньше расстояние между зажимом и пластиковой нитью, проходящей через тепловой барьер. Следовательно, у нити меньше места для изгиба и деформации под воздействием давления.

Директ экструдеры для 3D-принтера делают печатающую головку более громоздкой, как следствие выше инерционность, что требует более надежной конструкции рельс, если требуется получить хорошее качество печати. Так же это отражается на скорости 3D принтера, директ экструдеры по сравнению с боуден печатают на более низких скоростях. Возможные дефекты — это рябь на поверхности отпечатка.

Боуден экструдеры для 3D принтера предусматривает сборку двигателя и зубчатой передачи на раме принтера. Основное преимущество боуден экструдера — это скорость, т.к. печатающая головка имеет меньший вес.

Недостатком боуден экструдеров, является то, что в процессе перемещения нити по тефлоновой трубке, соединяющей механизм подачи и хотэнд, она может отклоняться и чем длиннее трубка, тем больше может быть отклонение, особенно это проявляется при втягивании нити и работе с гибкими пластиками. Размер втягивания и параметры 3D печати для гибких нитей подбираются опытным путем.

Еще одна проблема, которую необходимо решить при настройке боуден экструдеров — это трение. Поскольку нить необходимо проталкивать на некоторое расстояние внутри трубки, важно, чтобы двигатель и зубчатые передачи давали на нить достаточный крутящий момент и надежно прижимал пластиковую нить.

В большинстве настольных дельта 3D-принтеров используются боуден экструдеры.

Хотенды (хотэнды) для 3D принтера стандартные. Хотенд - это узел который непосредственно нагревает пластиковую нить, через который расплавленный пластик выдавливается на стол 3D принтера (рис. 2.4).

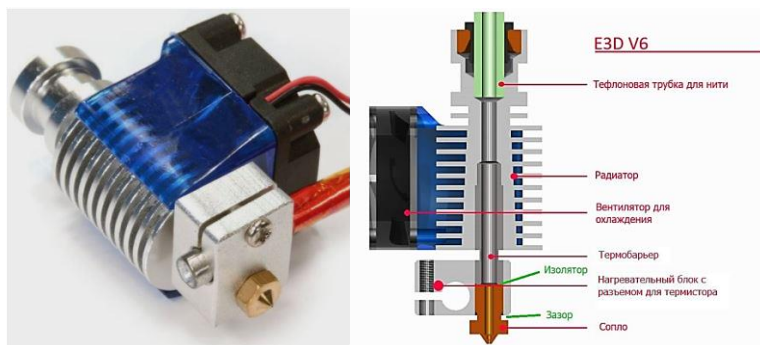


Рисунок 2.4 - Хотэнд E3D V6

Термобарьер, который ввинчивается в радиатор, часто представляет собой трубку из нержавеющей стали (или другого металла с низкой теплопроводностью, например, из титана) с резьбой.

Верхняя часть, которая активно охлаждается радиатором и специальным вентилятором (или системой водяного охлаждения, в некоторых экстравагантных случаях), предотвращает нагрев и ослабление нити до того, как она будет экструдирована.

Нижняя часть состоит из нагревательного блока, картриджа, термистора, температурного реле и сопла, изготовленного из латуни (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Нагревательный блок, сопло и термобарьер хотенда

Блок нагревателя, обычно изготовленный из алюминия, нагревает его картридж. Внутри блока нагревателя находится термистор — небольшой датчик, который передает значение температуры на материнскую плату 3D-принтера, что позволяет поддерживать её в заданном диапазоне.

2.2. Послойное нанесение расплавленного пластика. Достоинства и недостатки применяемой технологии

FDM (Fused Deposition Modeling) – метод послойного наплавления с использованием пластиковой нити. Принцип работы основан на изготовлении объекта путем послойного нанесения предварительно расплавленного гранулированного пластика или расплавленной пластиковой нити. Другое название этой технологии – FFF (Fused Filament Fabrication) (рис. 2.6).

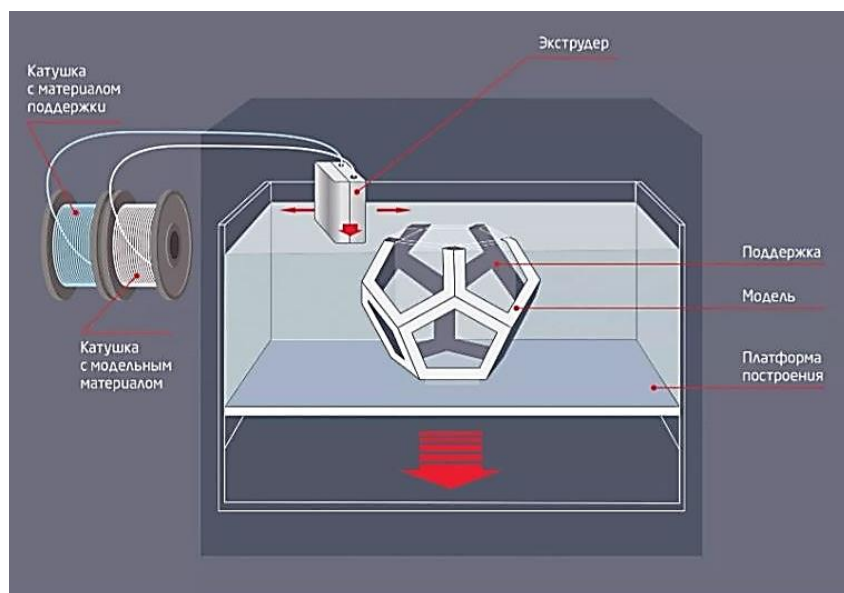


Рисунок 2.6 - Схема 3D-принтера, использующего FDM-технологию

Принцип действия FDM -технологии

1. Трехмерная модель создаётся в CAD–системе и экспортируется как поверхностная электронная модель в формате STL-файла.
2. Поверхностная электронная модель рассекается в программном обеспечении для 3D-принтера на горизонтальные слои, которые затем отправляются на печать.
3. Термопластичный моделирующий материал в форме тонкой нити, диаметром 1,75 мм, подаётся в экструзионную (выдавливающую) головку с системой регулировки температуры, где он разогревается до полужидкого состояния.

4. Выдавливающая головка наносит материал очень тонкими слоями на неподвижное основание, формируя за один проход законченный слой изделия. Последующие слои наносятся на предыдущие, отвердевают и таким образом соединяются друг с другом.

5. Заключительный этап – удаление поддерживающих структур.

В качестве расходного материала при FDM-технологии используют различные пластики, есть и модели 3D-принтеров, позволяющие работать с оловом, сплавами металлов с невысокой температурой плавления и шоколадом.

Достоинства FDM-технологии:

- возможность создания сложных деталей малых и больших габаритов;
- широкий выбор термопластиков или композитов, благодаря чему можно без труда подобрать необходимый по свойствам материал, а также выбрать предпочтительный цвет готового изделия;
- возможность проведения дополнительной обработки моделей;
- низкая себестоимость материалов и, как следствие, конечного изделия;
- доступная цена расходных материалов.

Недостатки FDM-технологии:

- невысокая скорость работы;
- небольшая разрешающая способность как по горизонтали, так и по вертикали, что приводит к более или менее заметной слоистости поверхности изготовленной модели;
- проблемы с фиксацией модели на рабочем столе (первый слой должен прилипнуть к поверхности платформы, но так, чтобы готовую модель можно было снять);
- для нависающих элементов требуется создание поддерживающих структур, которые впоследствии приходится удалять, но даже с учетом этого некоторые модели попросту невозможно сделать на FDM-принтере за один цикл, и приходится разбивать их на детали с последующим соединением склейкой или другим способом.

2.3. Печать простейших прототипов и функциональных изделий из пластика

Изготовление прототипов представляет собой важный этап на пути создания нового изделия. Оно позволяет изготовить опытный образец продукта для оценки его технических характеристик и потребительских качеств. Современные технологии прототипирования позволяют быстро и дешево производить штучные изделия, вносить корректировки в проект и ускорять его готовность к серийному выпуску. С помощью прототипа можно проанализировать эргономичность, тактильные ощущения, удобство применения, визуальное восприятие, дизайн, прочность и многие другие параметры будущей продукции. Кроме того, технические образцы незаменимы при проведении выставок и презентаций.

Изготовление прототипов методом послойного наплавления с использованием пластиковой нити проходит в несколько этапов:

1. Моделирование изделия на компьютере.
2. Подготовка модели к печати.
3. Изготовление опытного образца.
4. Постобработка изделия.
5. Тестирование полученной модели на соответствие различным требованиям.
6. Доработка изделия при необходимости.

Моделирование изделия на компьютере включает в себя проектирование изделия по эскизам, фотографиям, чертежам, готовым моделям (рис. 2.7) в системах автоматизированного проектирования и сохранение модели в форматах .m3d и .stl (рис. 2.8).

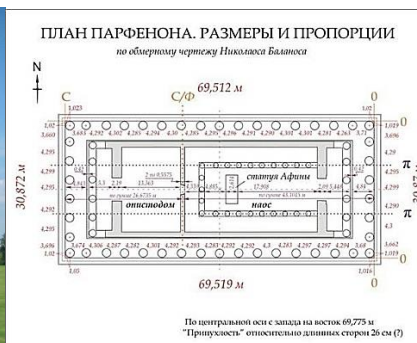


Рисунок 2.7 – Исходные данные для моделирования изделия

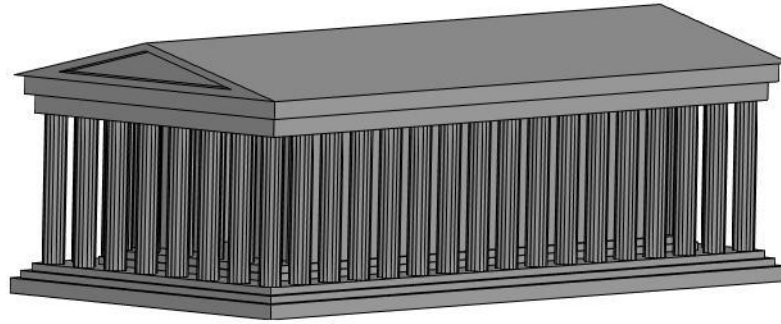


Рисунок 2.8 – Модель изделия в системе автоматизированного проектирования

Формат .m3d необходим для последующей доработки прототипа. Формат. stl универсальный, который содержит всю информацию о поверхности объекта в структуру которого входят: полигоны (фасеты) и их нормали. Первые нужны для задания поверхности, а вторые для указания где находится внешняя сторона полигона. Информация о файле STL описывает только геометрию модели, нет спецификаций о текстуре, цвете или материале вашей модели.

Подготовка модели к печати включает в себя создание управляющей программы, в которой выбираем материал будущего прототипа, указываем диаметр прутка пластика, отмечаем наличие поддержек и охлаждения, уточняем «Высоту слоя», регулируем плотность заполнения и указываем тип заполнения полнотелых моделей (рис. 2.9).

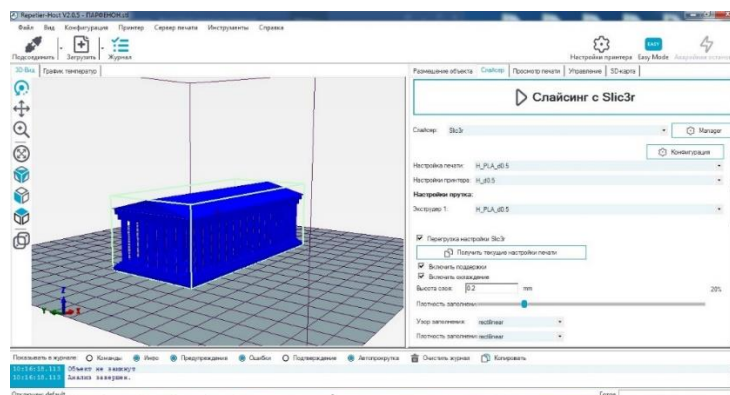


Рисунок 2.9 - Подготовка модели к печати

Изготовление опытного образца включает в себя печать прототипа на 3D-принтере в соответствии с созданной управляющей программой (рис. 2.10).

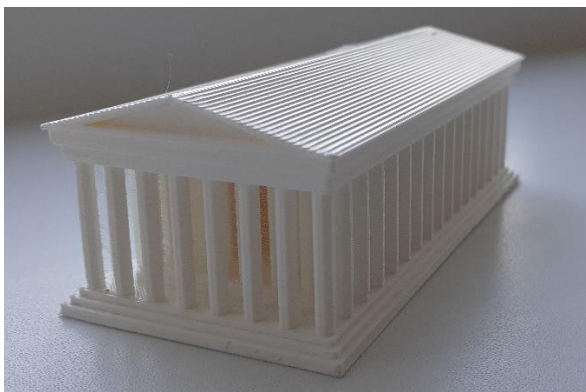


Рисунок 2.10 – Опытный образец макета греческого храма Парфенон

Постобработка изделия, изготовленного по FDM-технологии, включает в себя удаление поддерживающего материала; улучшение текстуры материала; повышение точности; улучшение эстетического восприятия; при необходимости, сборка модели.

Тестирование модели полученной методом послойного наплавления с использованием пластиковой нити на соответствие различным требованиям к изделию должны учитывать внешний вид, геометрические размеры, химический и фазовый составы, механические свойства; предел текучести или временное сопротивление и относительное удлинение, пористость.

Доработка изделия при обнаружении недостатков в конструкции на ранних стадиях проектирования и производства поможет избежать дорогостоящего перепроектирования и использования дополнительных инструментов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое экструдер?
2. В чём заключается процесс экструзии?
3. Какова основная функция экструдера 3D принтера?
4. Опишите конструкцию холодного узла экструдера.
5. Опишите конструкцию горячего узла экструдера.
6. Опишите принцип работы горячего узла экструдера.
7. Дайте определение FDM-технологии.
8. Опишите принцип действия FDM –технологии.
9. Какой расходный материал используют при FDM-технологии?
10. Перечислите этапы изготовления прототипов методом послойного наплавления с использованием пластиковой нити.
11. Для чего необходим формат файла *.m3d?
12. Для чего необходим формат файла *.stl?
13. Что включает в себя подготовка модели к печати при FDM-технологии?
14. Что включает в себя постобработка изделия, изготовленного по FDM-технологии?

ТЕМА 3. ТЕХНОЛОГИЯ 3D ПЕЧАТИ МЕТОДОМ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ

3.1. Технологическое применение SLA

SLA (Stereolithography Apparatus) - технология лазерной стереолитографии, основанная на послойном отверждении жидкого материала под действием луча лазера.

Стереолитографический аппарат был запатентован в 1986 году Чаком Халлом (Chuck Hull), соучредителем компании 3D Systems, и как раз с этого момента принято отсчитывать историю аддитивных технологий. Халл является изобретателем первой коммерческой технологии быстрого прототипирования, а также формата файлов STL, в котором стандартно сохраняются данные трехмерных моделей.

Лазерную стереолитографию отличает использование фотополимеров в жидком состоянии, которые накладываются тонкими слоями. Материал затвердевает под лазерным лучом или ультрафиолетовой лампой, после чего мы получаем готовую 3D-модель. Технология заключается, таким образом, в построении твердого тела в жидкой среде (рис. 3.1).

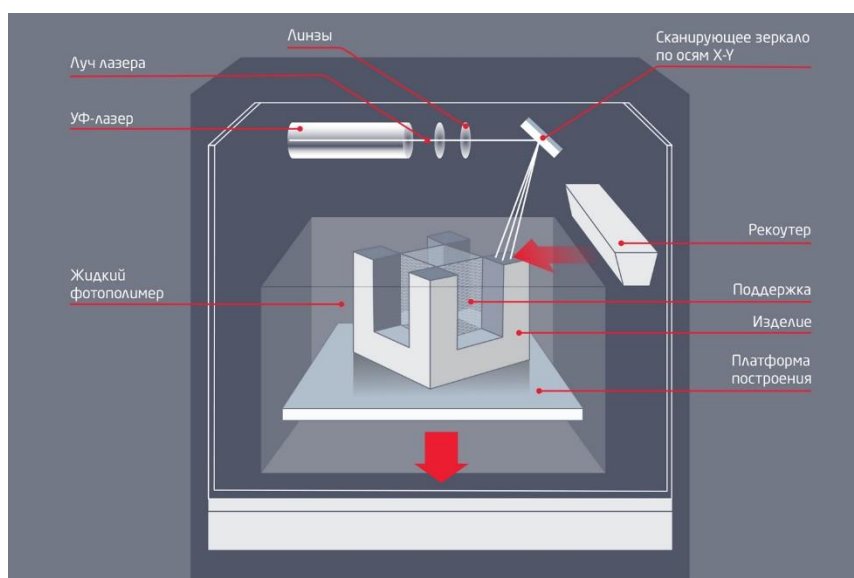


Рисунок 3.1 - Схема стереолитографического 3D-принтера

Принцип действия SLA-технологии

1. Фотополимерная смола заливается в емкость, в которую ставят подвижную платформу для выращивания изделия.

2. Платформа помещается на такую глубину, чтобы ее покрывал супертонкий слой фотополимера – толщиной от 0,05 до 0,13 мм. Это самое минимальное значение, доступное современным 3D-принтерам, – таким образом, лазерная стереолитография обеспечивает более высокую точность в сравнении с другими технологиями 3D-печати.

3. Затем в компьютерной программе активируется лазер. Лазерный луч прорисовывает первый слой на поверхности фотополимера, вызывая его затвердевание.

4. Для создания нового слоя платформа погружается на глубину, соответствующую толщине одного слоя. Выполняется необходимое количество таких циклов.

5. Когда объект построен, он подвергается обработке специальным раствором и финальной полимеризации мощным УФ-излучением.

6. В завершение процесса вручную удаляют поддержки, которые используются во многих аддитивных процессах.

В качестве расходного материала при SLA-технологии используют фотополимеры (светополимеры) - вещества, которые изменяют свои свойства под действием ультрафиолетового света. В обычном состоянии они характеризуются податливостью, но под действием ультрафиолетовых лучей приобретают прочность. Длительность облучения и длина волны устанавливаются в зависимости от материала для SLA-принтера, размеров выращиваемого изделия и окружающих условий.

Лазерная стереолитография может использоваться при создании оснастки, приспособлений или прототипов, а также при производстве промышленной керамики, формовании и литье по выжигаемым моделям (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 - Примеры изделий, изготовленных на SLA-машинах

Преимущества SLA - технологии:

- изготовление моделей любой сложности;
- легкая обработка полученного прототипа;
- высокое качество поверхности модели;
- возможность создания конечных фотополимерных изделий;
- объемная камера построения;
- широкий выбор материалов.

Недостатки SLA - технологии:

- изготовленные модели хрупкие и не подходят для функциональных прототипов;
- негативное воздействие солнечного света на механические свойства и внешний вид изделия;
- поддержки и пост-обработка при печати требуются всегда.

3.2. Технологическое применение DLP

Метод DLP (Digital Light Processing) был изобретен несколько позже – в 1987 году Ларри Хорнбеком из Texas Instruments, – правда, не для аддитивного производства, а для кинопроекции, где эта технология нашла широкое применение.

В DLP-печати используется проектор. Проектор излучает свет сразу на весь слой смолы, избирательно отверждая деталь с помощью тысяч мельчайших зеркал, называемых цифровыми микрозеркальными устройствами (digital micromirror devices, DMD), направляющими световую проекцию (рис. 3.3).

В этих проекторах для создания изображений используются пиксели, а слои состоят из вокселей, как в обычных 2D- или 3D-камерах.

Пиксель (иногда пэл, англ. pixel, pel — сокращение от pictures element, которое в свою очередь сокращается до pix element, в некоторых источниках picture cell — букв. элемент изображений) — наименьший логический элемент двумерного цифрового изображения в растровой графике, или физический элемент матрицы дисплеев, формирующих изображение. Пиксель представляет собой неделимый объект прямоугольной или круглой формы, характеризуемый определённым цветом. Растровое компьютерное изображение состоит из пикселей, расположенных по строкам и столбцам. Также пикселем называют элемент светочувствительной матрицы (сенсель — от sensor element).

Воксель - это изображение трехмерной области пространства, ограниченной заданными размерами, которая имеет свои собственные координаты узловой точки в принятой системе координат, свою собственную форму, свой собственный параметр состояния, который указывает на его принадлежность к некоторому моделируемому объекту, и обладает свойствами моделируемой области.

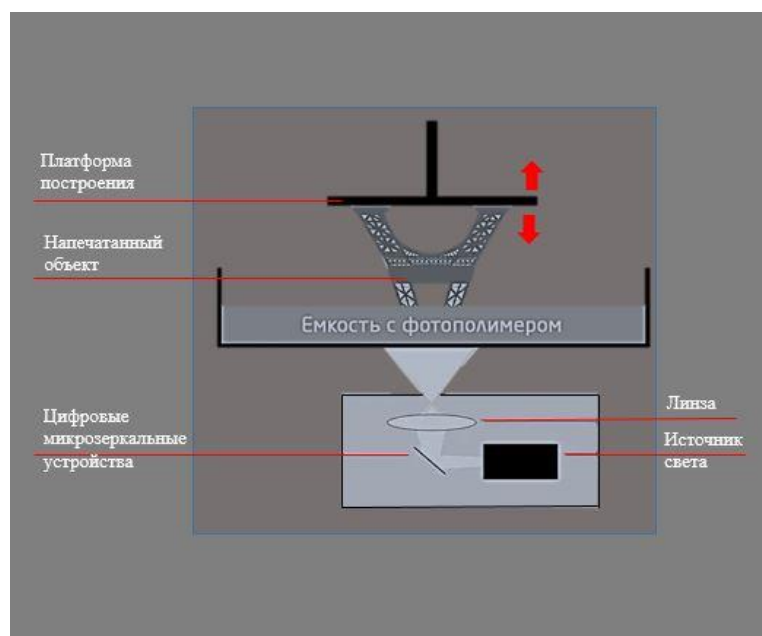


Рисунок 3.3 - Схема DLP-принтера

Принцип действия DLP-технологии

1. Фотополимерная смола заливается в емкость, в которую ставят подвижную платформу для выращивания изделия.
2. Платформа помещается на глубину, отступая от ее дна на толщину самого первого слоя будущего объекта.
3. Затем в соответствии с компьютерной программой на фотополимер направляется поток света из ультрафиолетового DLP-проектора, вызывая его затвердевание.
4. Для создания нового слоя платформа поднимается на глубину, соответствующую толщине одного слоя. Выполняется необходимое количество таких циклов.
5. Когда объект построен, он подвергается обработке специальным раствором и финальной полимеризации мощным УФ-излучением.
6. В завершение процесса вручную удаляют поддержки.

В качестве расходного материала при DLP-технологии используют фотополимерные смолы, имитирующие любые материалы, начиная от сверхтвердых пластиков и вплоть до резины. Все они представлены в большом варианте цветов.

Данную технологию используют при изготовлении мастер-копий и моделей для литья и прототипов функционального тестирования. С ее помощью печатают виниры, зубы для протезирования, коронки и другие стоматологические изделия; ювелирные изделия, в том числе и дизайнерской продукции; элементы сложных пространственных конфигураций малых объемов; игрушки, декоративные элементы, сувенирную продукцию; изделия медицинского назначения; элементы для сенсорных, измерительных устройств, систем «умного» освещения; матрицы для производства силиконовых форм и другие изделия, требующие высокой детализации.

Преимущества DLP - технологии:

- изготовление моделей любой сложности;
- легкая обработка полученного прототипа;
- высокая скорость печати;
- возможность создания конечных фотополимерных изделий;
- широкий выбор материалов.

Недостатки DLP - технологии:

- точность DLP печати значительно ниже, чем SLA;
- возможна паразитная засветка;
- поддержки и пост-обработка при печати требуются всегда.

3.3. LCD-технология, фотополимеризация с помощью жидкокристаллического экрана

LCD-печать (Liquid Crystal Display, жидкокристаллический дисплей) заключается в одновременной засветке целых слоев для отверждения фотополимера, но без применения зеркал. Вместо этого мощные жидкокристаллические панели излучают на модель свет с помощью светодиодов. ЖК-панель блокирует засветку в тех областях, которые не подлежат фотополимеризации.

Жидкокристаллический экран пропускает свет только через участки, подлежащие отверждению, на готовую деталь, упрощая процесс и устраняя необходимость в каких-либо зеркалах или гальванометрах (рис. 3.4).

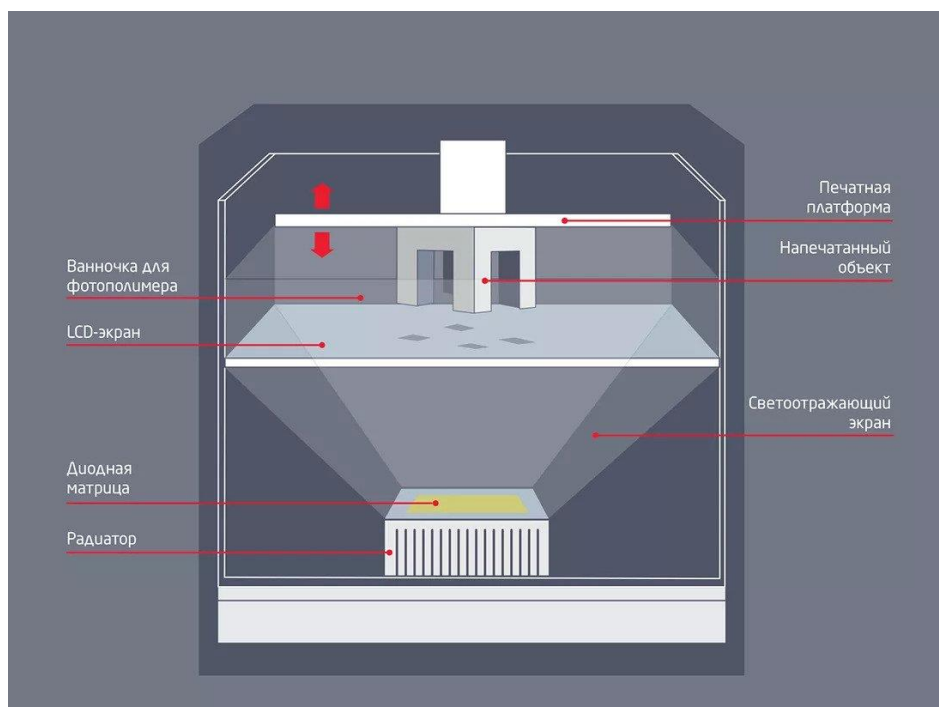


Рисунок 3.4 - Схема LCD-принтера

Принцип действия LCD -технологии

1. Фотополимерная смола заливается в емкость, в которую ставят подвижную платформу для выращивания изделия.
2. Платформа помещается на глубину, отступая от ее дна на толщину самого первого слоя будущего объекта.

3. Затем в соответствии с компьютерной программой на фотополимер жидкокристаллический экран пропускает свет на участки, подлежащие отверждению.

4. Для создания нового слоя платформа поднимается на глубину, соответствующую толщине одного слоя. Выполняется необходимое количество таких циклов.

5. Когда объект построен, он подвергается обработке специальным раствором и финальной полимеризации УФ-излучением.

6. В завершение процесса вручную удаляют поддержки.

В качестве расходного материала при LCD-технологии используют фотополимерные смолы, имитирующие любые материалы, начиная от сверхтвердых пластиков и вплоть до резины. Все они представлены в большом варианте цветов.

Данную технологию используют при изготовлении мастер-копий и моделей для литья и прототипов функционального тестирования. С ее помощью печатают виниры, зубы для протезирования, коронки и другие стоматологические изделия; ювелирные изделия, в том числе и дизайнерской продукции; элементы сложных пространственных конфигураций малых объемов; игрушки, декоративные элементы, сувенирную продукцию; изделия медицинского назначения; элементы для сенсорных, измерительных устройств, систем «умного» освещения; матрицы для производства силиконовых форм и другие изделия, требующие высокой детализации (рис. 3.5 – 3.6).

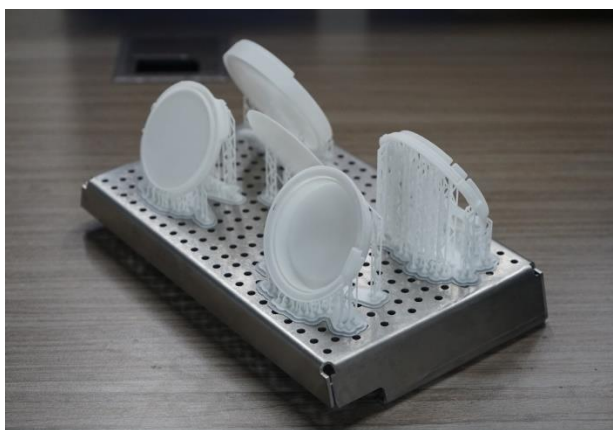


Рисунок 3.5 - Пример LCD-печати промышленных деталей



Рисунок 3.6 - Печать изделий для стоматологии на LCD-принтере

Преимущества LCD - технологии:

- изготовление моделей любой сложности;
- легкая обработка полученного прототипа;
- высокая скорость печати;
- возможность создания конечных фотополимерных изделий;
- широкий выбор материалов.

Недостатки LCD - технологии:

- точность LCD печати значительно ниже, чем DLP;
- качество печати может быть не одинаковым на всей области печати. Так как в качестве УФ источника используется массив светодиодов, а не один источник света, рабочая область может подсвечиваться неравномерно;
- скорость печати ниже, чем DLP. Светодиоды светят «слабее» проектора, поэтому время засветки слоя немного больше, но все равно LCD принтер печатает быстрее SLA.
- возможна паразитная засветка;
- поддержки и пост-обработка при печати требуются всегда.

3.4. Полимеризация пластика в ультрафиолетовой печи. Жидкие фотополимеры

Дополнительное отверждение изделия в ультрафиолетовой печи (англ. post curing) – один из этапов процесса 3D-печати по технологии стереолитографии.

Находясь в жидком состоянии, фотополимерная смола состоит из различных веществ, таких как мономеры, олигомеры, фотоинициаторы. Из большого количества веществ, входящих в состав смолы, эти три вещества – основные (рис. 3.7).

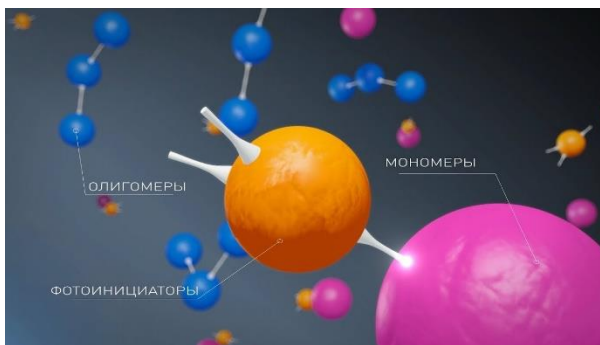


Рисунок 3.7 – Состав жидкой фотополимерной смолы

Мономеры – это основа любого полимера. Мономеры – это жидкое вещество, достаточно токсичное, с резким запахом. Для фотополимеров, обычно, используют или акриловый, или (мет)акриловый мономер. Поскольку акриловая связь под действием ультрафиолета легко разрушается, они объединяются между собой в более длинные цепочки. В стоматологических смолах используют метилметакрилат, как менее токсичное вещество.

Олигомеры - это предполимеризовавшийся мономер. Олигомеры делят на: эпоксиметакрилат (жёсткие и хрупкие – твердость вещества); уретан(мет)акрилат (максимально универсальные, от очень эластичных до жестких, но не хрупких); полиэфир-метакрилат (средняя жесткость и хрупкость). Можно получать смолы, которые будут напоминать вещества от силикона до очень твердых, практически граничащих с эпоксидами.

Фотоинициаторы - это связующее вещество и катализатор химической реакции полимеризации.

Воздействие на фотополимерную смолу ультрафиолетового излучения лазера приводит к тому, что фотоинициаторы вступают в реакцию, а мономеры связываются вместе и образуют полимер. Это первичная стадия отверждения.

Отвержденная смола представляет собой сшитую макромолекулу, то есть каждая ее часть непосредственно связана с любой другой ее частью. Однако после 3D-печати останется много не сшитых в достаточной степени участков, что влияет на прочность на разрыв и на другие свойства. Для завершения молекулярной связи и создания любой возможной перекрестной связи может быть использован ультрафиолетовый свет.

Солнечный свет преломляется в радуге в свои спектральные цвета. Видимый спектр имеет длину волны от 400 нм до 800 нм. Ультрафиолетовое излучение имеет невидимый спектр с длиной волны между 100 нм и 400 нм (рис. 3.8).

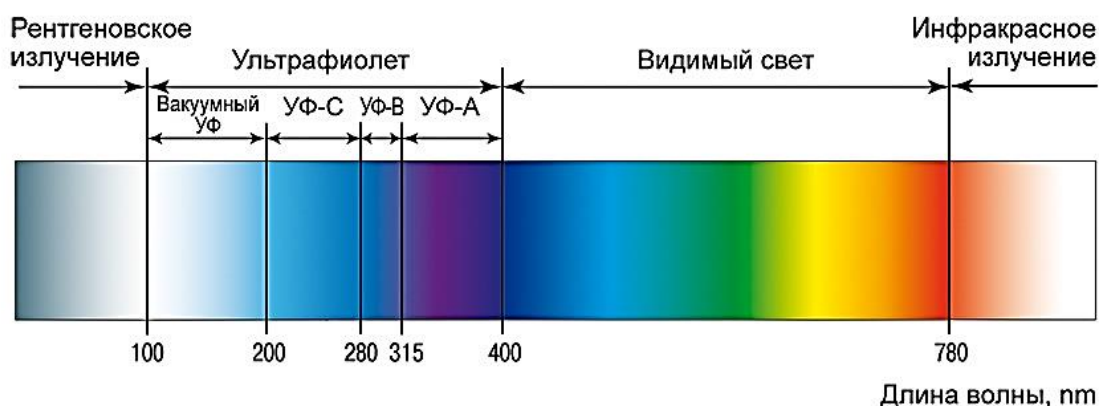


Рисунок 3.8 – Спектры солнечного света

Ультрафиолетовое излучение между 200 нм и 400 нм используется в промышленности и в быту для запуска реакций, таких как полимеризация, синтез или деградация различных веществ.

Для ультрафиолетовой полимеризации используются ультрафиолетовые лампы и LED диоды, которые имеют излучение в УФ-спектре.

УФ-излучение разрушает углерод-углеродную двойную связь одиночной молекулы (мономер, олигомер). Одиночные молекулы сшиваются с молекулярными цепями. Это сшивание называется полимеризация (УФ-сушка). Подходящие добавки, такие как фотоинициаторы, ускоряют цепную реакцию.

3.5. Печать высококачественных и детализированных прототипов

Прототип любой сложности и для любых целей можно посредством стереолитографии, которые становятся незаменимы в научно-исследовательских изысканиях.

Изготовление прототипов методом стереолитографии проходит в несколько этапов:

1. Моделирование изделия на компьютере.
2. Подготовка модели к печати.
3. Изготовление опытного образца.
4. Постобработка изделия.
5. Тестирование полученной модели на соответствие различным требованиям.
6. Доработка изделия при необходимости.

Моделирование изделия на компьютере включает в себя проектирование изделия (рис. 3.9) в системах автоматизированного проектирования.



Рисунок 3.9 – Моделирование изделия

Подготовка модели к печати включает в себя создание управляющей программы, в которой выбираем материал будущего прототипа, ориентацию объекта, опорные структуры и толщину слоя.

Изготовление опытного образца включает в себя печать прототипа на 3D-принтере в соответствии с созданной управляющей программой (рис. 3.10).

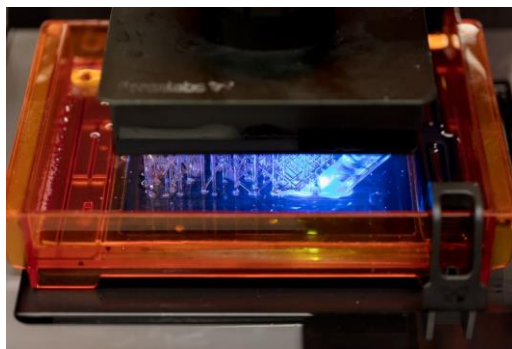


Рисунок 3.10 – Изготовление опытного образца прототипа

Постобработка изделия, изготовленного по технологии стереолитографии, включает очистку распечатанного прототипа изопропиловым спиртом (рис. 3.11), доотверждения в ультрафиолетовой камере, чтобы завершить процесс полимеризации и стабилизировать механические свойства (рис. 3.12).



Рисунок 3.11 – Очистка распечатанного прототипа



Рисунок 3.12 - Полимеризация пластика в УФ-камере

Далее, после просушки изделия, удаляют опорные структуры и зачищают поверхность. Напечатанные прототипы легко поддаются дальнейшей обработке, в том числе механической, их можно также загрунтовать, покрасить или задействовать в сборных конструкциях.

Тестирование модели полученной методом стереолитографии на соответствие различным требованиям к изделию должны учитывать внешний вид, геометрические размеры, химический состав, механические свойства, пористость.

Доработка изделия необходима при обнаружении недостатков в конструкции прототипа и включает в себя дополнительное проектирование базовой трехмерной модели изделия в CAD-системе.

3.6. Печать моделей для литья по выжигаемым моделям

Литье по выжигаемым моделям – одна из разновидностей точного литья. Технология применяется при изготовлении ответственных деталей в наукоемких отраслях промышленности (авиакосмической, судостроительной, оборонной, автомобильной и др.). Внедрение аддитивных технологий на литейном предприятии позволяет в значительной мере оптимизировать производственный процесс.

3D-печать дает возможность выращивать уникальные объекты сложной геометрии для получения высококачественных отливок. 3D-принтер воспроизводит практически любые формы и конфигурации, что невыполнимо при традиционном литье. Модели, которые созданы для литья по выжигаемым моделям аддитивными методами, могут быть гораздо тоньше, чем стандартно производимые в пресс-формах из пенополистирола.

Аддитивные технологии способны дать предприятию большой экономический эффект за счет снижения затрат на изготовление продукции и рабочую силу, а также существенной экономии времени производства. Благодаря 3D-печати получить первую отливку стало возможным не за полгода (срок изготовления традиционными методами), а всего за две недели.

Технологический процесс литья по выжигаемым моделям применяют для получения моделей больших размеров и повышенной прочности. Материалом для 3D-печати, используемом для изготовления форм является пластик (фотополимерная смола).

Выращивание выжигаемых моделей на 3D-принтере производится методом лазерной стереолитографии (Stereolithography Apparatus, SLA) – когда жидкий фотополимер затвердевает под действием лазера или УФ-лампы.

3.6.1. Печать по технологии QuickCast

Технология QuickCast позволяет выращивать модели на стереолитографических 3D-принтерах, минуя изготовление литейной оснастки. Как и сама технология лазерной стереолитографии, QuickCast – разработка компании 3D Systems (рис. 3.13).



Рисунок 3.13 - Литейные модели, изготовленные по технологии QuickCast

Пластиковые модели выдерживают достаточно большие нагрузки, но существует риск их деформации или разрушения. При выжигании, независимо от материала, в модели остается зола – сухой остаток от выгорания пластика. Производители легко решают эту проблему, используя материал с низким зольным остатком (не более 0,01% от первоначального объема модели). Еще одну опасность представляет сам материал модели. Когда он запечатан в керамическую оболочку, при нагреве пластик выгорает не так быстро, как воск, и процесс прокалики может достигать 10-12 часов. Пластиковая модель внутри керамической оболочки нагревается и создает избыточное давление на саму форму. Песчаная керамическая форма имеет нулевую пластичность, и как только порог превышен, модель сильно давит на литейную оболочку.

Чтобы избежать термических напряжений при прокалике, и была разработана технология QuickCast. Наружные стенки модели печатаются целиком (примерно 1 мм толщиной, в зависимости от габаритов), а пустота, образующаяся внутри, заполняется *сотовой структурой*, которая генерируется программным обеспечением в автоматическом режиме еще до печати. При нагреве модель и оболочка давят друг на друга, и за счет тонкостенной структуры модель начинает складываться внутрь, предотвращая разрушение формы (рис. 3.14).

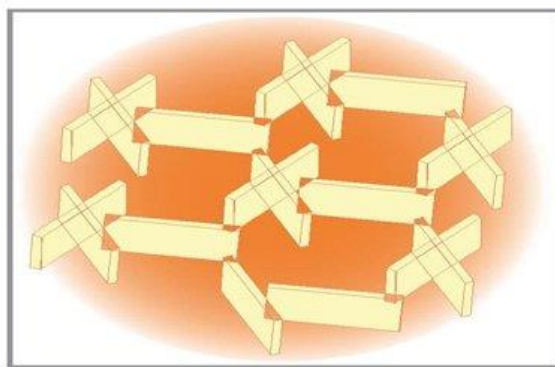


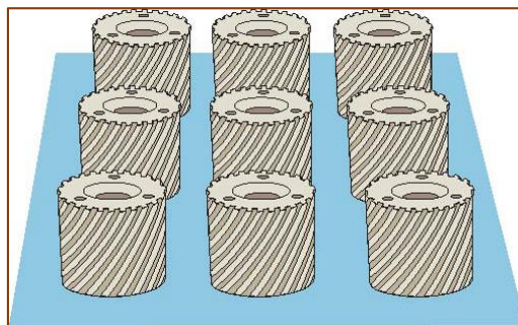
Рисунок 3.14 - Печать QuickCast-моделей

Преимущества QuickCast:

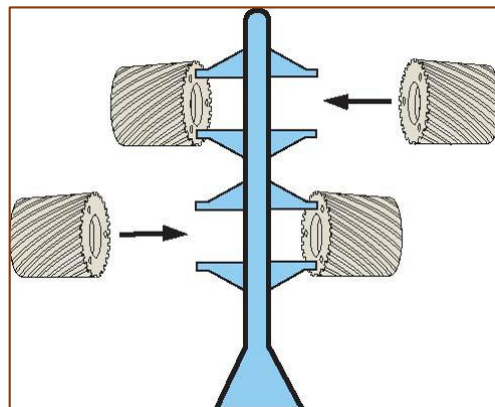
- высокая точность печати;
- значительная экономия времени и средств;
- отсутствие оснастки;
- экономичное использование материала и снижение массы модели;
- минимизация образования золы при выжигании модели из формы;
- предотвращение деформации в процессе термической обработки;
- минимальная постобработка;
- возможность малосерийного производства.

3.6.2. Этапы технологического процесса литья по выжигаемым моделям с применением литейных моделей, изготовленных по технологии QuickCast

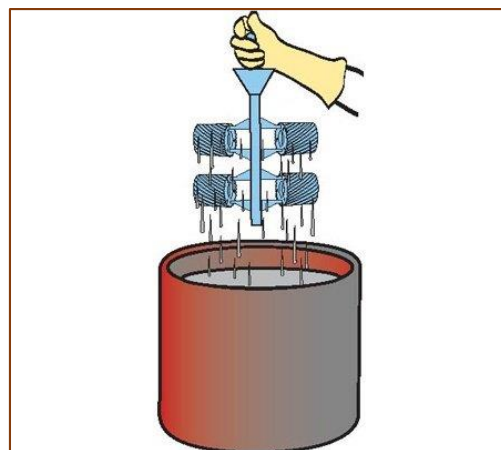
1. Построение выжигаемых моделей в стереолитографическом 3D-принтере и их постобработка



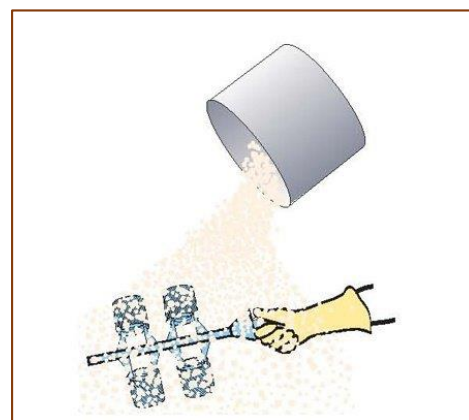
2. Крепление моделей к вертикальному
литниковому каналу



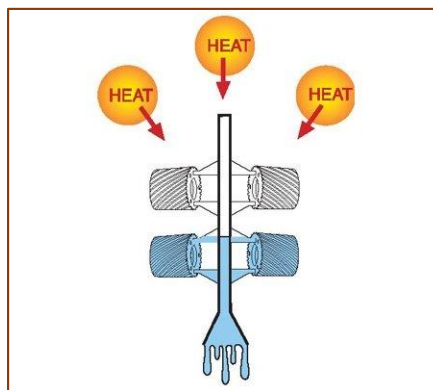
3. Создание оболочковой формы
методом погружения блока моделей в
огнеупорный керамический раствор



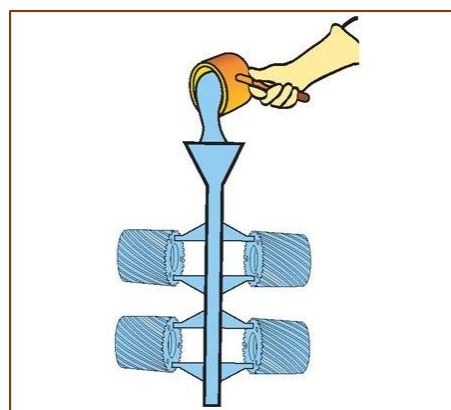
4. Покрытие оболочки мелким
керамическим огнеупорным песком.
Таких операций может быть несколько,
в зависимости от того, сколько слоев
твердой керамической оболочки нужно
получить



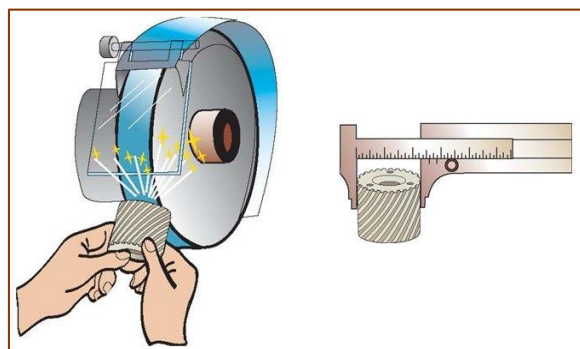
5. Выжигание моделей в прокалочной печи. Под воздействием температуры модель выгорает



6. Заливка жидкого металла в форму



7. Зачистка литников и проверка точности



Постобработка выжигаемых моделей включает: удаление поддержек, промывка, удаление материала из внутренней структуры, закрытие дренажа. Поскольку модель пустотелая, внутри остается материал. При печати создается отверстие, через которое материал будет вытекать. Когда модель опустошается, дренажные отверстия закрывают специальными средствами (например, паяльником и пластиковым присадком или литейным воском) (рис. 3.15).

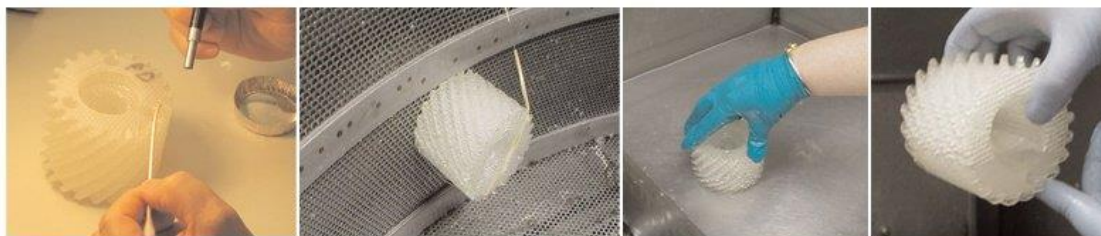


Рисунок 3.15 - Постобработка выжигаемых моделей

Технология QuickCast находит активное применение в различных отраслях. В России ее используют, среди прочих, крупные предприятия авиационной промышленности («Салют», «Сухой», УМПО), научные центры (НИАТ, НАМИ), энергетического машиностроения (Тушинский машиностроительный завод) (рис.3.16).



Рисунок 3.16 - Модель турбины, созданная на 3D-принтере

При производстве гидроагрегата на Тушинском машиностроительном заводе модель турбины собирают из сегментов, напечатанных на 3D-принтере.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение SLA -технологии.
2. Опишите принцип действия SLA –технологии.
3. Какой расходный материал используют при SLA-технологии?
4. Дайте определение DLP -технологии.
5. Опишите принцип действия DLP –технологии.
6. Какой расходный материал используют при DLP -технологии?
7. Дайте определение LCD -технологии.
8. Опишите принцип действия LCD –технологии.
9. Какой расходный материал используют при LCD -технологии?
10. Для чего необходимо дополнительное отверждение изделия в ультрафиолетовой печи в процессе 3D-печати по технологии стереолитографии?
11. Перечислите этапы изготовления прототипов методом стереолитографии.
12. Что включает в себя постобработка изделия, изготовленного по технологии стереолитографии?
13. Опишите технологию QuickCast.
14. Перечислите этапы технологического процесса литья по выжигаемым моделям с применением литейных моделей, изготовленных по технологии QuickCast

ТЕМА 4. ТЕХНОЛОГИЯ 3D ПЕЧАТИ МЕТОДОМ МНОГОСТРУЙНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1. Нанесение на платформу печатающей головкой через большое количество форсунок жидкого фотополимера. Послойное отверждение ультрафиолетовым проектором

Многоструйное моделирование (или многоструйная печать) – одна из фундаментальных аддитивных технологий, которая основана на послойном построении объекта из воска или фотополимера. Этот метод разработан и запатентован компанией 3D Systems под названием MultiJet Printing (MJP). Другое название технологии – MultiJet Modeling (MJM).

Одна из особенностей MJP, которая сближает ее с лазерной стереолитографией (SLA), – наличие так называемых поддержек (поддерживающих структур) для выступающих или нависающих элементов детали, предназначенной для 3D-печати. По завершении построения в 3D-принтере поддержки с легкостью удаляются.

Основные области применения MJP-технологии: литейное производство; ювелирное дело; медицина (в том числе стоматология); автомобильная промышленность; потребительские товары.

С помощью многоструйного моделирования создают функциональные модели для проверки на собираемость; прототипы; модели для испытаний; концептуальные модели для утверждения дизайна; оснастку; выжигаемые и выплавляемые модели (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 - Изделия, создаваемые с помощью многоструйного моделирования

Главное достоинство технологии – способность обеспечить высочайшее качество и идеальную гладкость поверхности готовых изделий (рис. 4.2).

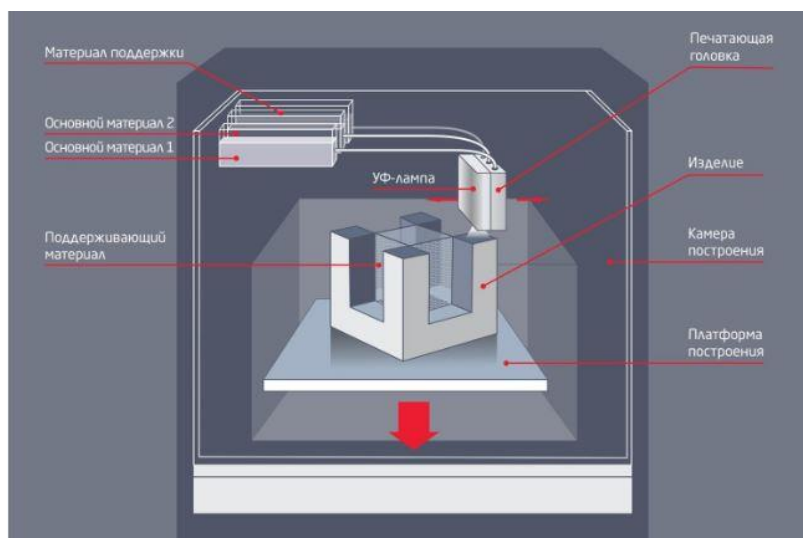


Рисунок 4.2 - Схема 3D-принтера, использующего технологию многоструйной печати

Принцип действия технологии многоструйной печати

1. Трехмерная модель рассекается в программном обеспечении CAD на горизонтальные слои, которые затем отправляются на печать.

2. Технология MJP функционирует по аналогии с обычной струйной печатью. Слой наносится печатающей головкой, оснащенной множеством мельчайших сопел, через которые на горизонтальную платформу подается модельный материал. Число сопел в разных моделях 3D-принтеров варьируется от 96 до 448. Печатающая головка напыляет материал по контурам слоя модели. Еще одна головка предназначена для разравнивания каждого нового слоя.

3. Воск или фотополимер расплавляется в подогреваемом при температуре 80 С картридже еще до попадания в печатающую головку.

4. После нанесения слоя фотополимер подвергается засвечиванию ультрафиолетовой лампой и затвердевает. Модель, напечатанная из воска, охлаждается естественным путем.

5. Заключительный этап – удаление поддерживающих структур. Если модель печатается из воска, поддержку удаляют специальным раствором. При использовании фотополимера изделие помещается в печь, где поддержка выплавляется при высокой температуре (примерно 60 С). Сложным изделиям требуется дополнительная обработка в ультразвуковой ванне.

В устройствах многоструйной печати применяют термопластики, восковые и фотополимерные материалы.

При печати воском для изделия подбирают более твердый, а для поддержек – более мягкий или легкоплавкий воск. Полученные объекты идеальны для изготовления литевых форм.

Что касается фотополимеров, многообразие свойств делает эти материалы по-настоящему универсальными. Фотополимерные модели могут иметь различные цвета, быть эластичными и жесткими, матовыми и прозрачными, композитными, термостойкими, биосовместимыми, схожими по свойствам с полипропиленом и ABS-пластиками и обладать многими другими характеристиками.

Достоинства многоструйной печати:

- точность построения и исключительно качественная детализация изделий (толщина слоя – от 13 до 32 микрон);
- высокая скорость получения моделей;
- широкий выбор и высокое качество модельных материалов.

Недостатки многоструйной печати:

- возможность использования преимущественно в функциональном прототипировании;
- уязвимость модели к действию прямых солнечных лучей;
- относительно высокая стоимость расходных материалов.

4.2. Печать высококачественных и детализированных прототипов

Технология многоструйного моделирования (MJM - Multi Jet Modeling) - это метод многоструйного выращивания прототипов. 3D печать MJM предназначена для высококачественного прототипирования полнофункциональных узлов, деталей и других различных объектов.

Изготовление прототипов методом многоструйного моделирования проходит в несколько этапов:

1. Моделирование изделия на компьютере.
2. Подготовка модели к печати.
3. Изготовление опытного образца.
4. Постобработка изделия.
5. Тестирование полученной модели на соответствие различным требованиям.
6. Доработка изделия при необходимости.

Моделирование изделия на компьютере включает в себя проектирование изделия в системах автоматизированного проектирования. Особенностью изготовления прототипов методом многоструйного моделирования является возможность использования нескольких материалов в одной детали. Важной особенностью будет являться соответствие количества используемых материалов количеству элементов в одной CAD-модели изделия. Они должны быть равны по количеству! *(Например, если моделируется ролик с твердой основой и упругой поверхностью, то CAD-файл ролика должен состоять из двух частей – твердой основы ролика и его упругой поверхности).* Таким образом, подготовка файлов для данного вида прототипирования должна производиться только в профессиональных системах твердотельного моделирования с последующей конвертацией в полигональный формат.

Подготовка модели к печати включает в себя создание управляющей программы, в которой задаются параметры качества печати, производится разбивка детали на слои.

Изготовление опытного образца включает в себя печать прототипа на 3D-принтере в соответствии с созданной управляющей программой.

Постобработка изделия, изготовленного по MJM-технологии, включает очистку и промывку прототипа от слоев поддержки; постотверждение детали в ультрафиолетовой камере.

Далее, после просушки, следует удаление поддерживающих структур. Если модель печатается из воска, поддержку удаляют специальным раствором. При использовании фотополимера изделие помещается в печь, где поддержка выплавляется при высокой температуре (примерно 60° C). Сложным изделиям требуется дополнительная обработка в ультразвуковой ванне.

Тестирование модели полученной методом многоструйного моделирования на соответствие различным требованиям к изделию должны учитывать внешний вид, геометрические размеры, химический состав, механические свойства, пористость.

Доработка изделия необходима при обнаружении недостатков в конструкции прототипа и при несоответствии количества используемых материалов количеству элементов в одной CAD-модели изделия.

4.3. Печать моделей для литья по выжигаемым и выплавляемым моделям

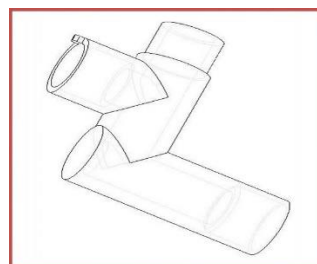
Технологический процесс литья по выжигаемым моделям схож с другой технологией точного литья, основанной на выплавлении воска. Основное отличие – в материале для 3D-печати, используемом для изготовления форм: при выжигании применяется пластик (фотополимерная смола). Литье по выплавляемым моделям – процесс более точный, идеальный для создания небольших объектов с мелкими деталями (например, ювелирных изделий, стоматологических имплантатов). Если требуется получить модели больших размеров и повышенной прочности, применяется выжигание. Также надо отметить, что фотополимеры экономичнее воска.

Выращивание выжигаемых моделей на 3D-принтере производится методом многоструйного моделирования (MultiJet Printing, MJP) с помощью фотополимерного материала сопоставимо с лазерной стереолитографии (Stereolithography Apparatus, SLA) – когда жидкий фотополимер затвердевает под действием лазера или УФ-лампы.

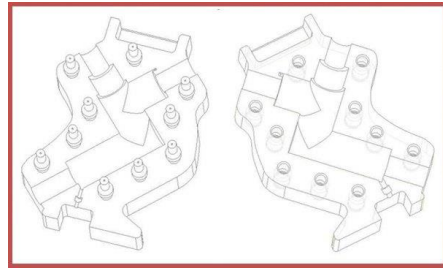
Печать методом многоструйного моделирования применяют при изготовлении литьевых форм, которая затем заливается силиконом. В силиконовую форму можно заливать любой другой материал, в данном случае это полиуретан. В результате предприятие получает своего рода форму для форм – не просто прототип, а опытный образец, готовый к использованию.

Процесс изготовления литьевой формы

1. 3D-модель разветвителя



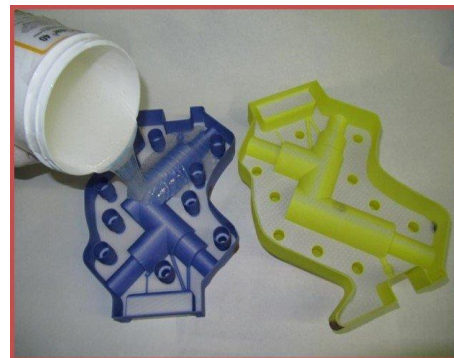
2. 3D-модель литейной формы из двух частей



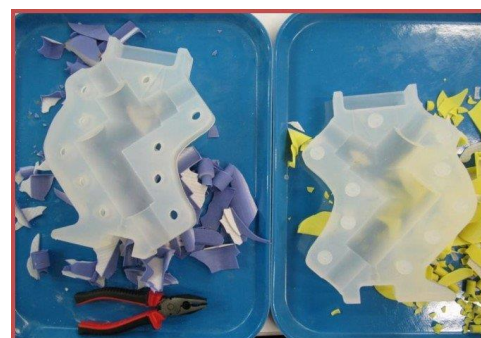
3. Мастер-форма, напечатанная на 3D-принтере



4. Процесс заливки силиконом

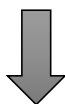


5. Извлечение формы. Силиконовая форма в точности повторяет геометрию изделия

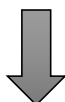


6. Сборка заливочной формы.

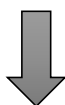
Поскольку изделие имеет внутренние полости, они оформляются стержневой оснасткой. В форму вкладывается стержень, состоящий из трех частей. Конструкция собирается и ставится вертикально. Через трубку и штуцер (внизу) в полость заливается полиуретан



7. Процесс заливки полиуретаном



8. Извлечение готовой детали. Остается форма, которую можно использовать еще несколько сотен раз



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение технологии многоструйного моделирования.
2. Опишите принцип действия технологии многоструйной печати.
3. Какой расходный материал используют в устройствах многоструйной печати?
4. Перечислите этапы изготовления прототипов методом многоструйного моделирования.
5. Что является важной особенностью изготовления прототипов методом многоструйного моделирования?
6. Что включает в себя постобработка изделия, изготовленного по технологии многоструйного моделирования?
7. Опишите процесс изготовления литевой формы.

ТЕМА 5. ТЕХНОЛОГИЯ 3D ПЕЧАТИ МЕТОДОМ ЦВЕТНОГО СКЛЕИВАНИЯ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА

5.1. Технология полноцветной струйной 3D-печати

Реалистичные цветные модели с высоким разрешением помогают оценить внешний вид конечного продукта. Создание подобных изделий стало возможным благодаря технологии полноцветной струйной 3D-печати, запатентованной компанией 3D Systems под названием ColorJet Printing (CJP).

Технология основана на послойном склеивании гипсового порошка специальным клеящим составом и применяется для прототипирования моделей смешанной цветовой гаммы, сложной формы или фактуры, а также для выпуска небольших партий продукции (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 - Изделия, полученные методом CJP

CJP используется в промышленном производстве, архитектуре, изготовлении сувенирной продукции, производстве потребительских товаров. На сегодня это самый распространенный метод полноцветной 3D-печати.

Если говорить о практических задачах, которые решает технология ColorJet Printing, то к ним относятся:

- создание архитектурных и строительных макетов для демонстрации идеи заказчику;
- изготовление демонстрационных образцов в прототипировании, дизайне, производстве;
- макетирование в образовательных или медицинских целях;
- проверка на собираемость несложных сборочных изделий;

- контроль эргономики и внешнего вида изделий на ранних стадиях производства;
- проверка восприятия товара фокус-группами.

Технология ColorJet Printing заключается в использовании двух компонентов — базового и связующего.

Основной компонент, мелкодисперсный композитный материал, запатентован и носит название VisiJet PXL Core, обладающий отличной цветопередачей. Из него возводятся слои модели. Им также наполняется рабочая камера.

Связующий элемент «сращивает» частички основного материала, придавая форму и цвет модели. CJP-принтеры компании 3D Systems используют связующие материалы ColorBond (для упрочнения цветных моделей), StrengthMax (высокопрочная пропитка для функциональных моделей) или Salt Water Cure (экологическая пропитка повышенной прочности поверхностных слоев).

Рассматриваемый метод полноцветной 3D-печати имеет следующие преимущества:

- скорость печати;
- широкая цветопередача (390000 оттенков);
- отсутствие поддерживающих структур;
- низкая себестоимость;
- безотходное использование;
- точность (минимальный размер топологического элемента – 0,1 мм);
- легкость в эксплуатации.

5.2. Раскатывание ракелем или роликом по рабочей поверхности. Нанесением на слой специального связующего вещества. Склеивание в цельную деталь

3D-принтер, в котором реализована CJP-технология, состоит из двух основных блоков – камеры построения для основного материала и камеры очистки для удаления лишнего материала. В некоторых моделях 3D-принтеров камера очистки поставляется в качестве дополнительного оборудования (рис. 5.2).

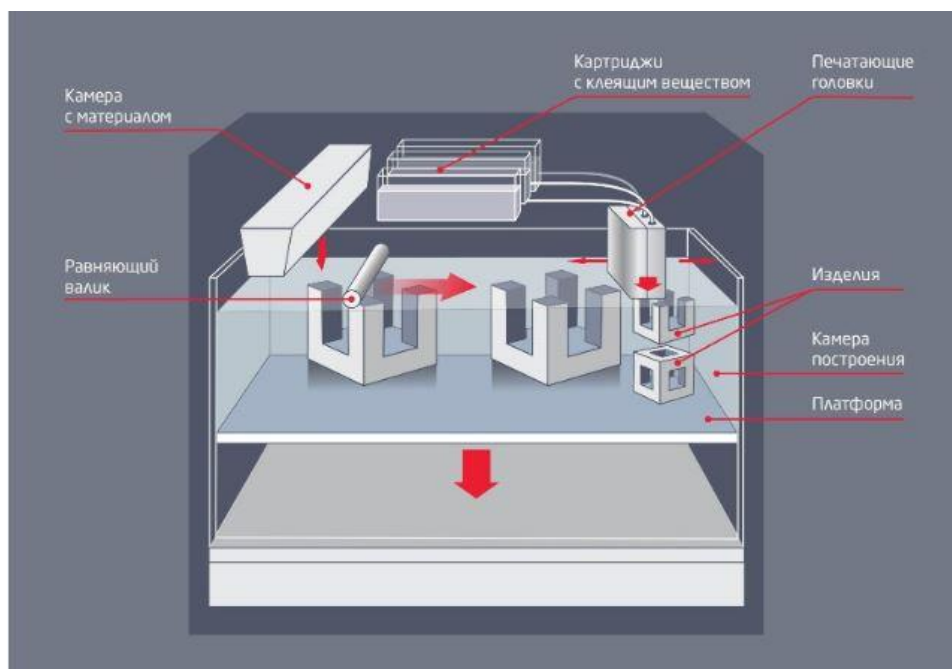


Рисунок 5.2 - ColorJet Printing: конструкция 3D-принтера

Одна из особенностей технологии заключается в том, что в процессе печати не задействуются поддержки. Поддерживающей структурой для модели служит несклеившийся порошок, который удаляется в камеру очистки и может быть использован в очередной сессии 3D-печати.

Этапы технологического процесса полноцветной струйной 3D-печати:

1. 3D-модель изделия экспортируется из САПР в виде полигональной сетки, разделяется на поперечные сечения и выводится на дальнейшую печать.
2. Тонкий слой порошка подается на стол построения 3D-принтера и разравнивается ракелем или роликом.

3. Сверху на порошок выборочно наносится связующее вещество.
4. Камера опускается ниже на уровень слоя (0,1016 мм), наносится следующий слой порошка.
5. Процесс повторяется до тех пор, пока не завершится построение детали.
6. Далее лишний порошок выкачивается из камеры 3D-принтера встроенной вакуумной системой, и готовая деталь извлекается.

Объекты, полученные методом СJP-печати, хрупкие, после создания требуется аккуратная постобработка. После постобработки их достаточно пропитать специальными составами – цианокрилатом или эпоксидной смолой, чтобы повысить прочность готового прототипа. Изделия, пропитанные цианокрилатом, высыхают очень быстро – в среднем за полчаса, но несколько уступают в прочности деталям, обработанным эпоксидной смолой. Она высыхает дольше – до суток, однако изделия становятся твердыми.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение технологии полноцветной струйной 3D-печати.
2. Опишите принцип действия технологии многоструйной печати.
3. Какой расходный материал используют в устройствах полноцветной струйной 3D-печати?
4. Перечислите этапы изготовления прототипов методом полноцветной струйной 3D-печати.
5. Что включает в себя постобработка изделия, изготовленного по технологии полноцветной струйной 3D-печати?

ТЕМА 6. ТЕХНОЛОГИЯ 3D ПЕЧАТИ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

6.1. Технология селективного лазерного спекания

SLS (Selective Laser Sintering) – селективное лазерное спекание, одна из наиболее широко применяемых аддитивных технологий. Принцип действия SLS заключается в точечном спекании пластиковых порошков с разными компонентами лазерным лучом. Также существуют машины, которые спекают порошковый металл. Мощность луча в производственных 3D-принтерах варьируется от 30 до 200 ватт.

Технология 3D-печати по технологии SLS широко применяется в авиакосмической промышленности; машиностроении; литейном производстве; строительстве; в архитектуре, искусстве, дизайне.

Селективное лазерное спекание используется при изготовлении: функциональных прототипов; продукции мелкосерийного производства; моделей для точного литья по выплавляемым моделям; шлангов труб, прокладок, изоляционных шайб и других элементов в инженерии и строительстве; деталей силовых установок (рис. 6.1).



Рисунок 6.1 - Изделия, полученные методом SLS

Модели и прототипы, созданные методом SLS, имеют превосходные механические характеристики: они отличаются прочностью, гибкостью, хорошей детализацией и термической стабильностью. В плане прочности полученных изделий селективное лазерное спекание конкурирует с традиционными способами производства, такими как литье под давлением.

Благодаря широкому ассортименту материалов технология SLS достаточно универсальна. Сюда входят однокомпонентные порошки или порошковые смеси из различных материалов, таких как: полиамидные порошки (PA11, PA12, TPU и др.); модифицированные порошки (стеклонаполненные, керамонаполненные и др.); ВЮ-совместимые полиамиды.

Преимущества SLS-технологии:

- при построении геометрически сложных деталей не используется материал поддержки. В роли поддерживающей структуры выступает порошок, не подвергшийся воздействию лазерного луча;
- широкий выбор материалов;
- возможность моделировать сложнейшую геометрию;
- значительная экономия времени на сборку;
- большой объем камер построения;
- высокая скорость печати.

Недостатки SLS-технологии:

- Напечатанные детали требуют охлаждения в течение довольно долгого времени, вплоть до 12 ч., что замедляет производственный процесс.
- Высокая пористость поверхности напечатанных моделей, требуется не очень простая постобработка.
- Частые проблемы в ходе печати – усадка и деформация моделей.
- Образуется много отходов порошка, которые не подлежат переработке.
- Особые требования к помещению и условиям эксплуатации (главное – это фильтрация воздуха при кондиционировании, так как порошок вреден).

6.2. Разравнивание порошка ракелем по рабочей поверхности. Заштриховывание контура детали при помощи импульсного излучения. Воздействие высокоэнергетического лазерного луча для спекания шаровидных пластиковых гранул между собой

3D-принтеры, работающие по технологии SLS, имеют гибкие настройки. В зависимости от поставленных задач регулируются такие параметры, как температура, глубина и время воздействия. Также пользователь может задать работу либо только с переходными границами, либо спекание по всей глубине модели (рис. 6.2).

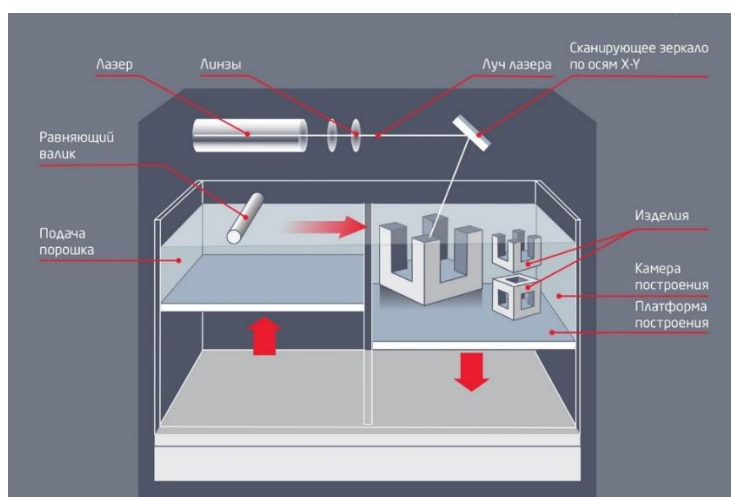


Рисунок 6.2 - Схема SLS-технологии

Технологический процесс селективного лазерного спекания:

1. Технологический процесс начинается с разогревания материала до температуры, близкой к температуре плавления, что обеспечивает более быструю работу порошкового 3D-принтера.
2. Порошок подается в камеру построения и разравнивается ракелем или валиком на толщину минимального слоя материала.
3. Лазерный луч спеклет слои порошка в необходимых участках, совпадающих с сечением 3D-модели.
4. Подается следующий слой порошка, камера построения опускается на уровень ниже.
5. Процедура повторяется, пока не получится готовое изделие.

По завершении процесса построения может потребоваться финишная обработка. Для придания изделию идеально ровной формы выполняют полировку или шлифовку. Однако по мере усовершенствования технологий потребность в постобработке изделий, изготовленных на SLS-принтерах, становится все менее актуальной.

6.3. Создание конечных изделий сложной геометрии. Легковесные конструкции. Функционально интегрированные детали

Селективное лазерное спекание (SLS) — это технология аддитивного производства, в которой используется мощный лазер для спекания мелких частиц полимерного порошка в прочную структуру на основе 3D-модели.

3D-печать по технологии SLS была популярна среди инженеров и производителей на протяжении десятилетий. Благодаря низкой себестоимости модели, высокой производительности и распространенным материалам эта технология отлично подходит для решения широкого спектра задач: от быстрого прототипирования до производства в малых объемах, изготовления ограниченных пробных партий или создания изделий по индивидуальному заказу.

Создание изделий методом селективного лазерного спекания проходит в несколько этапов:

1. Моделирование изделия на компьютере.
2. Подготовка модели к печати.
3. Изготовление опытного образца.
4. Постобработка изделия.
5. Тестирование полученной модели на соответствие различным требованиям.
6. Доработка изделия при необходимости.

Моделирование изделия на компьютере включает в себя проектирование изделия в системах автоматизированного проектирования и сохранение модели в форматах .m3d и .stl.

Подготовка модели к печати включает в себя создание управляющей программы, в которой нарезаем модель на слои, оцениваем время печати, располагаем объекты в заданном порядке, настраиваем параметры печати (рис. 6.3).

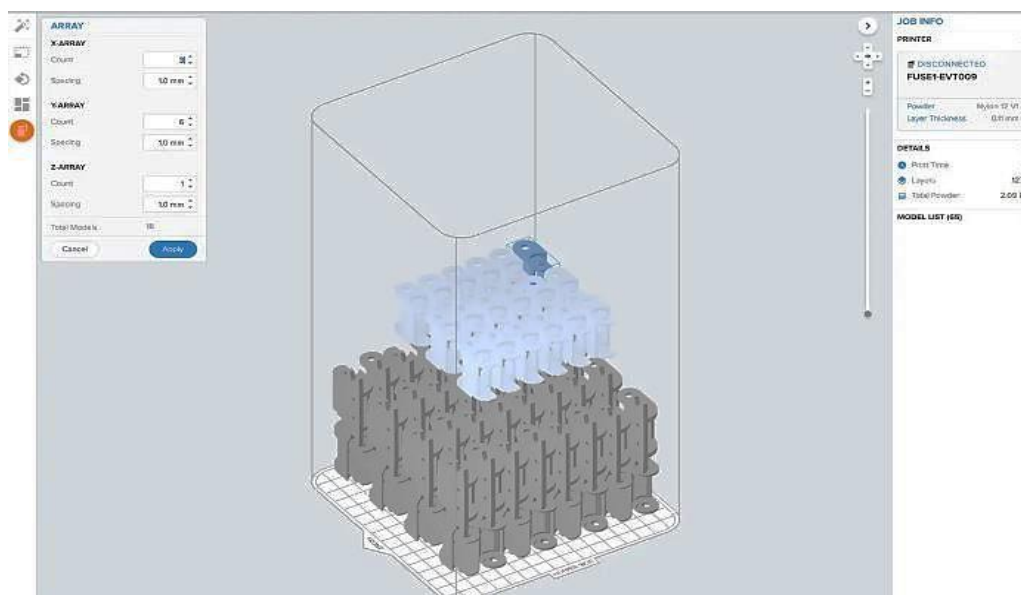


Рисунок 6.3 - Подготовка модели к печати

Изготовление опытного образца включает в себя печать прототипа на 3D-принтере в соответствии с созданной управляющей программой (рис. 6.4).



Рисунок 6.4 – Опытный образец изделия

Постобработка изделия, изготовленного по SLS-технологии не предполагает использования поддержек, и включает в себя, извлечение из камеры остывшей модели, очищение от остаточного порошка. Для удаления зернистости с

поверхности необходима галтовочная или струйная обработка. Модели можно окрашивать пульверизатором, лакировать, покрывать электролитическим или другим способом для получения нужного цвета, качества поверхности и свойств, например, водонепроницаемости (специальное покрытие) и электропроводности (электролитическое покрытие).

Лишний порошок, оставшийся после создания модели, фильтруют, чтобы удалить из него крупные частицы. После этого его можно переработать. Под воздействием высокой температуры свойства неспекшегося порошка слегка ухудшаются, поэтому для последующей печати его нужно смешивать с новым материалом. Обычно в технологии SLS применяются отдельные устройства для восстановления, хранения и смешивания порошка.

Тестирование модели полученной методом селективного лазерного спекания на соответствие различным требованиям к изделию должны учитывать внешний вид, геометрические размеры, химический и фазовый составы, механические свойства; предел текучести или временное сопротивление и относительное удлинение, пористость.

Доработка изделия, изготовленного по технологии SLS необходима при обнаружении недостатков в конструкции.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение технологии селективного лазерного спекания.
2. Какой расходный материал используют в устройствах селективного лазерного спекания?
3. Опишите технологический процесс селективного лазерного спекания.
4. Опишите этапы создания изделий методом селективного лазерного спекания.
5. Что включает в себя постобработка изделия, изготовленного по технологии селективного лазерного спекания?

ТЕМА 7. ТЕХНОЛОГИЯ 3D ПЕЧАТИ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

7.1. Селективное (выборочное) лазерное плавление

SLM (Selective Laser Melting) – селективное (выборочное) лазерное плавление – новаторская технология изготовления сложных по форме и структуре изделий из металлических порошков по математическим CAD-моделям. Этот процесс заключается в последовательном послойном расплавлении порошкового материала посредством мощного лазерного излучения.

SLM открывает перед современными производствами широчайшие возможности, так как позволяет создавать металлические изделия высокой точности и плотности, оптимизировать конструкцию и снизить вес производимых деталей.

Селективное лазерное плавление – одна из технологий 3D-печати металлом, которые способны с успехом дополнять классические производственные процессы. Оно дает возможность изготавливать объекты, превосходящие по физико-механическим свойствам продукты стандартных технологий. С помощью SLM-технологии можно создать уникальные сложнопрофильные изделия без использования механической обработки и дорогой оснастки, в частности, благодаря возможности управлять свойствами изделий.

Селективное лазерное плавление призвано решать сложные задачи на авиакосмических, энергетических, нефтегазовых, машиностроительных производствах, в металлообработке, медицине и ювелирном деле.

Селективное лазерное плавление находит применение в промышленности для изготовления компонентов разнообразных агрегатов и узлов; конструкций сложной формы и структуры, включая многоэлементные и неразборные; штампов; деталей пресс-форм; прототипов; ювелирных изделий; имплантатов и протезов в медицине и стоматологии (рис. 7.1).



Рисунок 7.1 - Примеры применения технологии селективного лазерного плавления

Наиболее популярными материалами при селективном лазерном плавлении являются порошковые металлы и сплавы, включая нержавеющую сталь, инструментальную сталь, кобальт-хромовые сплавы, титановые сплавы, титан, алюминий, золото, платина и др.

Преимущества технологии селективного лазерного плавления:

- высокая точность и повторяемость;
- механические характеристики изделий, напечатанных на этом типе 3D-принтера, сравнимы с литьем;
- решение сложных технологических задач, связанных с изготовлением геометрически сложных изделий;
- построение сложнопрофильных деталей без использования оснастки;
- уменьшение массы изделия за счет построения объектов с внутренними полостями;
- экономия материала при производстве.

Недостатки технологии селективного лазерного плавления:

- высокие затраты на изготовление;
- детали требуют последующей обработки, такой как удаление порошка, удаление опор и шлифовка поверхности;
- размер в настоящее время ограничен одним метром;
- большое потребление электроэнергии, в следствие использования лазера.

7.2. Разравнивание порошка ракелем по рабочей поверхности.

Заштриховывание контура детали при помощи импульсного излучения

При селективном лазерном плавлении все параметры процесса устанавливаются производителем. Высота слоя, используемого в 3D-печати металлами, варьируется от 20 до 50 микрон и зависит от свойств металлического порошка (текучести, гранулометрического состава, формы и т. д.).

Базовый размер области печати при SLM-технологии составляет 200 x 150 x 150 мм, но бывают и более большие размеры рабочего поля. Точность печати составляет от 50 - 100 микрон (рис. 7.2).

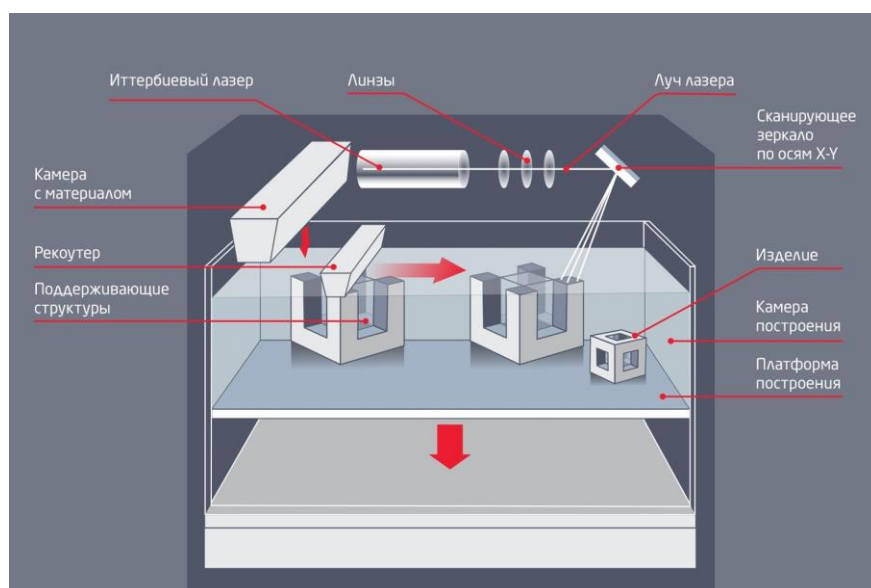


Рисунок 7.2 - Схема SLM-технологии

Технологический процесс селективного лазерного плавления:

1. Технологический процесс начинается с заполнения камеры инертным газом (аргоном или азотом) для минимизации окисления металлического порошка. Основной объем газа расходуется на начальном этапе, когда путем продувки из камеры построения удаляется весь воздух
2. Камеру нагревают до оптимальной температуры производства.
3. Металлический порошок наносится на плиту построения, которая закреплена на платформе построения и распределяется ракелем (рекоутером).

4. Лазерный луч направляется в направлениях X и Y с помощью двух высокочастотных сканирующих зеркал. Энергия лазера достаточно интенсивна, чтобы обеспечить полное плавление (сварку) частиц с образованием твердого металла.

5. После завершения формирования слоя, платформа построения опускается на толщину слоя и рекоутер наносит следующий слой порошка.

6. Процедура повторяется, пока не получится готовое изделие.

Когда камера построения остывает до комнатной температуры, неизрасходованный порошок удаляется, а детали подвергают дополнительной термической обработке для снятия остаточных напряжений, затем удаляют поддержки. Детали отделяют (спиливаются) от платформы построения и готовы к использованию или последующей обработке.

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

7.3. Воздействие высокоэнергетического лазерного луча для спекания сферических с металлическим наполнением гранул между собой

Процесс, получивший название не прямое лазерное спекание металлов (IMLS), был разработан компанией DTMcorp of Austin в 1995 году. С 2001 года DTMcorp принадлежит компании 3D-Systems. В процессе непрямого лазерного спекания используют смесь порошка и полимера или порошок, покрытый полимером, где полимер выступает в роли связки и обеспечивает необходимую прочность для проведения дальнейшей термической обработки. На стадии термической обработки проводятся отгонка полимера, спекание каркаса и пропитка пористого каркаса металлом-связкой, в результате которой получается готовое изделие.

Для непрямого лазерного спекания можно использовать порошки как металлов, так и керамики или их смесей. Приготовление смеси порошка с полимером проводят механическим смешиванием, при этом содержание полимера составляет около 2-3 % (по массе), а в случае использования порошка, покрытого полимером, толщина слоя на поверхности частицы составляет около 5 мкм. В качестве связки используют эпоксидные смолы, жидкое стекло, полиамиды и другие полимеры. Температура отгонки полимера определяется температурой его плавления и разложения и в среднем составляет 400-650° С. После отгонки полимера пористость изделия перед пропиткой составляет около 40 %.

При пропитке печь нагревают на 100-200° С выше точки плавления пропитываемого материала, поскольку с повышением температуры уменьшается краевой угол смачивания и понижается вязкость расплава, что благоприятно влияет на процесс пропитки.

Обычно пропитку будущих изделий проводят в засыпке из оксида алюминия, которая играет роль поддерживающего каркаса, поскольку в период от отгонки полимера до образования прочных межчастичных контактов существует опасность разрушения или деформации изделия. Защиту от окисления организуют с помощью создания в печи инертной или восстановительной среды.

Для пропитки можно использовать довольно разнообразные металлы и сплавы, которые удовлетворяют следующим условиям. Материал для пропитки должен характеризоваться незначительным межфазным взаимодействием, или его полным отсутствием, малым краевым углом смачивания и иметь температуру плавления ниже, чем у основы. Обычно для пропитки металлического каркаса используют бронзу, при этом усадка изделия составляет 2-5 %.

7.4. Создание конечных изделий сложной геометрии

Селективное лазерное плавление (SLM) — это технология аддитивного производства, в которой используется мощный лазер для плавления частиц металлического порошка в прочную структуру на основе 3D-модели.

3D-печать по технологии SLM используют в промышленности для создания конечных инженерных продуктов. Селективное лазерное плавление металлических порошков незаменимо в процессах, требующих повышенной скорости воспроизведения в комплексе с хорошим качеством. Она оптимально подходит для печати высокопрочных изделий плотной структуры и сложной пространственной конфигурации, с перфорацией, внутренними каналами.

Создание изделий методом селективного лазерного плавления проходит в несколько этапов:

1. Моделирование изделия на компьютере.
2. Подготовка модели к печати.
3. Изготовление опытного образца.
4. Постобработка изделия.
5. Тестирование полученной модели на соответствие различным требованиям.
6. Доработка изделия при необходимости.

Моделирование изделия на компьютере включает в себя проектирование изделия в системах автоматизированного проектирования и сохранение модели в форматах .m3d и .stl (рис. 7.3).

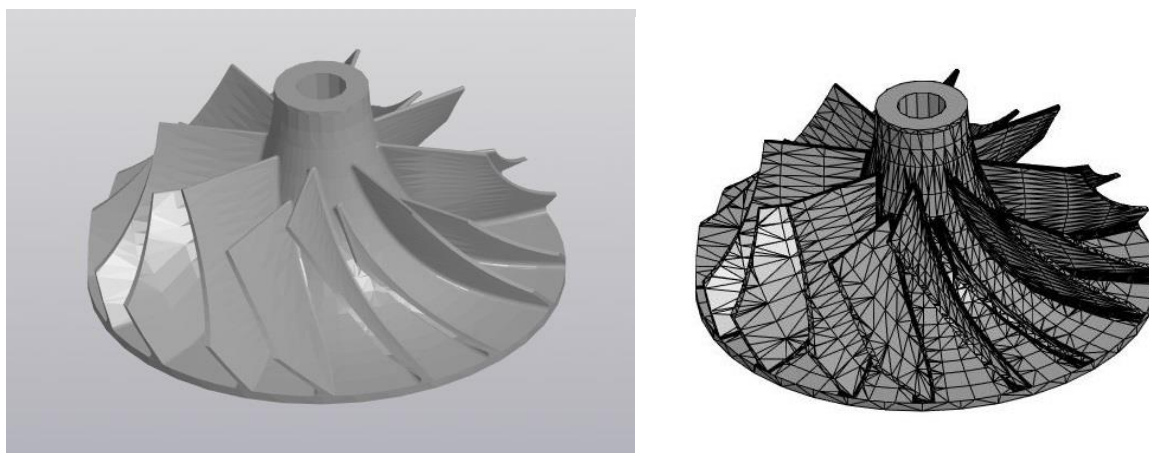


Рисунок 7.3 - Модели изделия в форматах .m3d - слева и .stl - справа

Подготовка модели к печати методом селективного лазерного плавления включает в себя создание управляющей программы. На данном этапе задается положение компонентов друг относительно друга на подложке построения, скорость построения, качество поверхности, пористость, некоторые физико-химические свойства металлов. Такой комплексный подход позволяет минимизировать расход материала, снизить затраты денег и времени на производственный процесс. Основываясь на полученной информации, программа станка самостоятельно подбирает векторы экспонирования и скорость процесса, мощность луча лазера, расстояние между штриховыми линиями, определяющими шаг обработки – толщину слоя (программа условно разбивает объект на отдельные слои).

При подготовке модели к печати необходимо уделить внимание структуре поддержки 3D-модели и ориентации изделия 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: являются основанием для создания первого слоя детали, закрепляют деталь на платформе и предотвращают её деформацию, 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.

Изготовление опытного образца включает в себя печать прототипа на 3D-принтере в соответствии с созданной управляющей программой (рис. 7.4).



Рисунок 7.4 – Опытные образцы изделия

Постобработка изделия, изготовленного по SLM-технологии включает в себя, удаление излишек порошка после охлаждения камеры построения до комнатной температуры и термообработку, чтобы снять любые остаточные напряжения. Затем изделия отделяют от плиты построения с помощью резки, механической обработки или электроэрозионной обработки и удаляют поддерживающие элементы.

При необходимости постобработка изделия может включать: токарную операцию, фрезерную операцию, шлифование, пескоструйную обработку. Шероховатость поверхности соответствует половине диаметра частиц металлического порошка стандартная около 15-16 мкм, пескоструйная обработка дает повышение класса шероховатости до 8-10 мкм.

Лишний порошок, оставшийся после создания модели, просеивают и применяют повторно.

Тестирование модели полученной методом селективного лазерного плавления на соответствие различным требованиям к изделию должны учитывать внешний вид, геометрические размеры, химический и фазовый составы, механические свойства; предел текучести или временное сопротивление, относительное удлинение, ударную вязкость и пористость.

Доработка изделия, изготовленного по технологии SLM необходима при обнаружении недостатков в конструкции.

7.5. Изготовление форм для литья пластика

Пластмассовые платы производятся в больших количествах методом литья под давлением с использованием сложных пресс-форм с несколькими закаленными литьевыми полостями. Для достижения качества деталей на одном уровне с прототипами могут быть использованы мастер-модели. Эти мастер-модели представляют собой пресс-формы, созданные с использованием профилирующей вставки. Профилирующую вставку можно получить путем быстрого прототипирования (например, фрезерованием вставки из алюминия) или с помощью лазерного спекания или плавления лазерным лучом.

Профилирующие вставки изготавливают с использованием различных процессов, таких как селективное лазерное спекание, прямое лазерное спекание металла (DMLS), селективное лазерное плавление (SLM) или лазерная наплавка. Минимальная толщина слоя, достижимая на сегодня, составляет 20 мкм. Профилирующие вставки, полученные таким образом, могут быть интегрированы в мастер-форму. Преимущество этих профилирующих вставок заключается в том, что они идеально подходят для получения небольших литьевых полостей сложных форм. Поскольку используется аддитивный производственный процесс, стоимость возрастает пропорционально объему полости, но не степени сложности ее формы. Следовательно, процессы лазерного спекания и плавления лазерным лучом в первую очередь подходят для изготовления небольших сложных геометрических объектов. С профилирующими вставками, изготовленными этими методами, могут быть использованы все коммерчески доступные термопласты. Тем не менее, срок службы полости, полученной посредством лазерного спекания или плавления лазерным лучом, ограничен, поэтому возможное количество отливок значительно ниже, чем при использовании пресс-форм из закаленной стали.

Например, по расчетам компании FIT Truth Innovative Technologies, вставки, изготовленные DMLS-методом, рассчитаны на 500 отливок. Срок службы пресс-формы можно значительно увеличить с помощью профилирующих вставок из специальных материалов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение технологии селективного (выборочного) лазерного плавления.
2. Какой расходный материал используют в устройствах селективного лазерного плавления?
3. Опишите технологический процесс селективного лазерного плавления.
4. Опишите этапы создания изделий методом селективного лазерного плавления.
5. Какие функции выполняют поддержки при создании изделий методом селективного лазерного плавления?
6. Что включает в себя постобработка изделия, изготовленного по технологии селективного лазерного плавления?

ТЕМА 8. ПРОТОТИПИРОВАНИЕ В ИНДУСТРИИ

8.1. Выбор материала для приложения и метода проектирования

Выбор материала для конкретного приложения и метода проектирования базируется на следующем перечне технологий производства, в которых в качестве шаблонов можно использовать прототипы, созданные методом аддитивного производства:

- вулканизационное литье из силикона при комнатной температуре;
- вакуумное литье;
- формовое блочное литье;
- аэрозольное металлическое литье;
- литьевое прессование пластмасс;
- литье в песчаные формы из алюминия и черных металлов;
- литье по выплавляемым моделям.

Выбор технологии зависит от размеров и геометрии прототипа, типа материала функций, требуемой точности и количества компонентов, которые необходимо изготовить.

8.2. Конструирование и дизайн

Область применения аддитивных технологий и изготовления изделий методом быстрого прототипирования определяется достижимой точностью изготовления детали и механическими свойствами используемого материала — растяжимостью, твердостью и прочностью на разрыв. Варианты конструкторского применения прототипов можно разбить на три основные группы:

- прототипы для оценки проекта;
- прототипы для функциональной оценки;
- модели для дальнейшего производственного процесса.

Прототипы для оценки проекта. Современные системы твердотельного моделирования упрощают оценку проекта благодаря наличию таких функций, как просмотр, затенение, вращение и увеличение. Однако не подлежит сомнению, что проект можно оценить более адекватно, когда конструктор может потрогать и подержать в руках физический прототип конструкции. Даже несмотря на огромный опыт в чтении чертежей или CAD-изображений сложных объектов, отчетливо представить себе, как будет выглядеть реальная деталь, — очень сложная задача. Такие особенности, как слепые отверстия, сложные внутренние каналы и поверхности сложной кривизны, зачастую трудно интерпретировать. Сокращение количества ошибок за счет улучшенной визуализации детали может быть значительным. Нет лучшего способа удостовериться в том, что сложная деталь имеет именно те свойства, которые планировались, чем подержать ее в руках, повертеть и посмотреть на нее со всех сторон. Физический объект необходим, в частности, для эстетической оценки дизайна.

Прототипы для функциональной оценки. Когда проект готов, конструктор должен удостовериться, что он обеспечивает выполнение всех функций, которые предполагались изначально. Простая функциональная оценка может включать проверку практичности сборки, кинематических и аэродинамических характеристик.

Часто бывает необходимо проверить, можно ли легко собрать продукт из составляющих или разобрать его для обслуживания. Нередко оказывается, что

собрать продукт можно лишь с большими трудностями, а порой и вовсе невозможно. Возможность сборки простых конструкций или ее простоту можно оценить, глядя на чертеж. Однако на практике принято выполнять такую проверку путем реальной сборки. В этом случае прототипы, создаваемые методом быстрого прототипирования, оказываются весьма полезными, поскольку компоненты, сделанные из другого материала, являются тем не менее достаточно адекватными для выполнения сборки. Использование прототипов вместо реальных компонентов дает значительную экономию времени и средств.

При тестировании кинематических характеристик проверяется, функционируют ли движущиеся части сборной конструкции так, как это задумывалось. Движению деталей часто препятствуют неожиданные помехи или другие компоненты сборки. Поскольку кинематические характеристики могут быть проверены на компонентах, не имеющих такой степени прочности, какая требуется для конечного продукта, прототипы, изготовленные методом аддитивных технологий, снова оказываются полезными.

Прототип, созданный посредством быстрого прототипирования, можно использовать также для проверки аэродинамических характеристик конструкции путем ее продувки в аэродинамической трубе. Ключевую роль в определении аэродинамических характеристик детали играет ее геометрическая форма, поэтому здесь подойдет прототип, изготовленный из другого материала. Однако для проверки других характеристик — прочности, пределов рабочей температуры, усталости и коррозионной устойчивости — требуется, чтобы прототип был сделан из того же материала, что и оригинальная конструкция.

Модели для дальнейшего производственного процесса. Сейчас опробован ряд подходов, позволяющих относительно быстро и рентабельно пройти путь от прототипа до реальной функциональной детали.

Значительные преимущества обеспечивает, например, сочетание изготовления моделей для литья. В этом случае литейная модель и стержни изготавливают по аддитивной технологии и используют так же, как деревянные модели и обычные стержни. Модели могут использовать также для копирования.

8.3. Построение моделей в архитектуре

Компьютерное моделирование нетиповых 3D-объектов доступно только специалистам, знакомым с профессиональными системами автоматизированного проектирования.

На архитектурном макете можно проводить тесты еще до того, как будет готов окончательный вариант плана застройки. Более того, реально изготовление прототипов зданий, над которыми проводятся такие тесты, которые на готовом изделии не проведешь. Например, можно использовать прозрачную пластиковую модель системы водоснабжения при проектировании нетиповых сооружений, таких как вращающийся небоскреб или студии с изменяемым внутренним объемом.

Внутренняя структура зданий, несущие конструкции, наполнение этажей техническими решениями также могут быть спроектированы на стадии моделирования (рис. 8.1-8.3).



Рисунок 8.1 - Проектирование здания физкультурно-оздоровительного комплекса

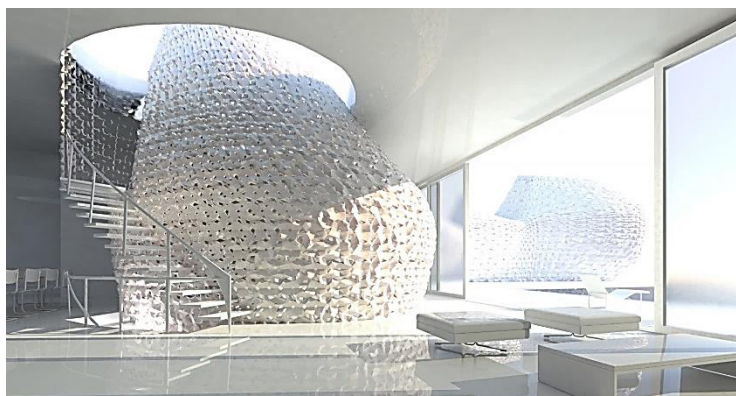


Рисунок 8.2 - Моделирование внутренней отделки дома

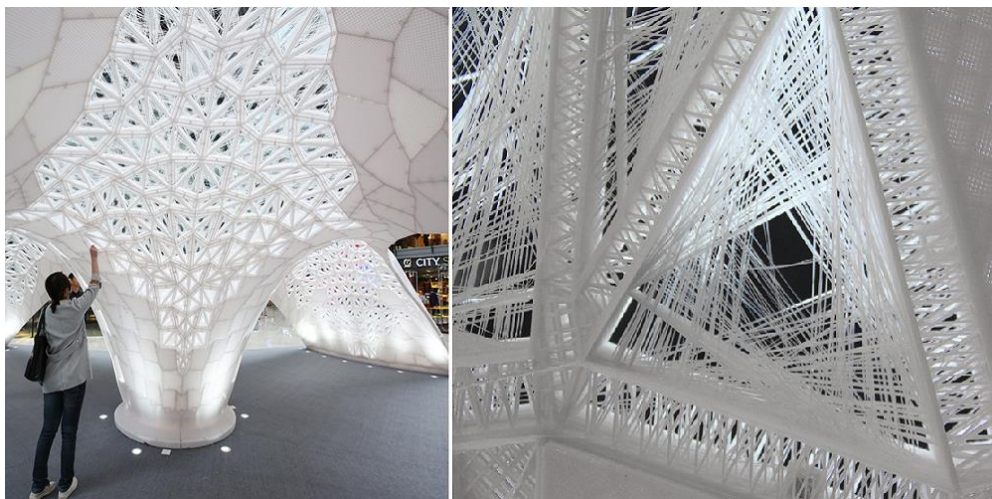


Рисунок 8.3 - Новые модернистские решения в архитектуре.

Павильон напечатанный на 3D принтере (Пекин)

Первый в России напечатанный жилой коттедж был возведен еще в 2017 году г. Ступино. Дом площадью 38 м² создан при помощи строительного 3D-принтера иркутской компании Aris Cor (рис. 8.4).



Рисунок 8.4 - Первый 3D-напечатанный дом в России (г. Ступино)

На строительство стен потребовалось всего лишь 24 часа. Остальные работы (монтаж кровли и окон, внутренняя и внешняя отделка) заняли еще около трех недель. Строительство «под ключ» (включая фундамент, стены, перекрытия, кровлю, электропроводку, двери и окна, наружную и внутреннюю отделку) обошлось в сумму 593,6 тыс. руб. В расчете не учитывалась цена работ некоторых специалистов.

8.4. Примеры применений в машиностроении, анализ и планирование

Практически в любой отрасли машиностроения технологии аддитивного производства смогут оказаться полезными.

Конструкция нового блока гидравлических клапанов, разработанного компаниями VTT и Nurmi Cylinders, была оптимизирована с использованием технологии селективного лазерного плавления (SLM), позволившей значительно сэкономить вес, объем и материал. В результате было создано изделие, вес которого на 66% меньше исходной модели. Благодаря инновационному дизайну удалось оптимизировать поток жидкости по внутренним каналам и решить проблему утечки (рис. 8.5).

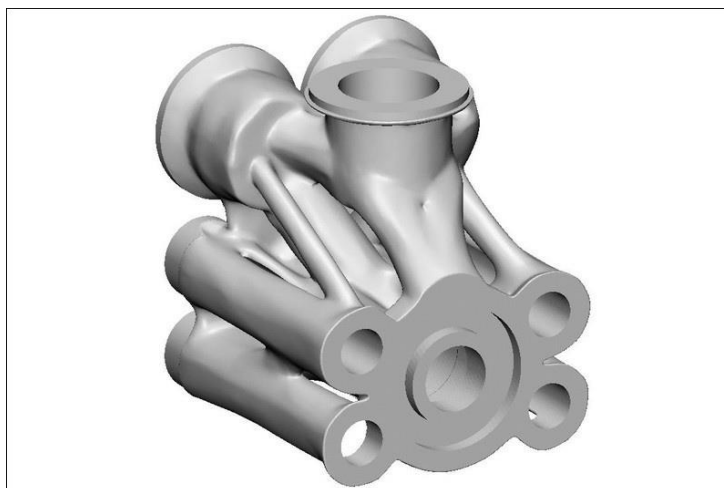


Рисунок 8.5 - Финальный CAD-файл блока клапанов, готовый к 3D-печати

Центр быстрого прототипирования Jures, использующий оборудование SLM Solutions, выполнил проект по усовершенствованию смесителя жидкости с газом. Изначально устройство собиралось из 12 частей, включая 3 крупных элемента – первое и второе фланцевые корпусные соединения и вставка смесителя. Селективное лазерное плавление дало возможность создать единый корпус, сократив количество деталей с 12 до одной. Отпадает необходимость использовать несколько металлов и фланцевых соединений: внутри цельнометаллического корпуса просто нарезается резьба, благодаря чему вес смесителя уменьшился с 1,3 кг до 50 г. В два раза сократилось время производства. И наконец, финансовые затраты на производство уменьшились на 73% (рис.8.6).

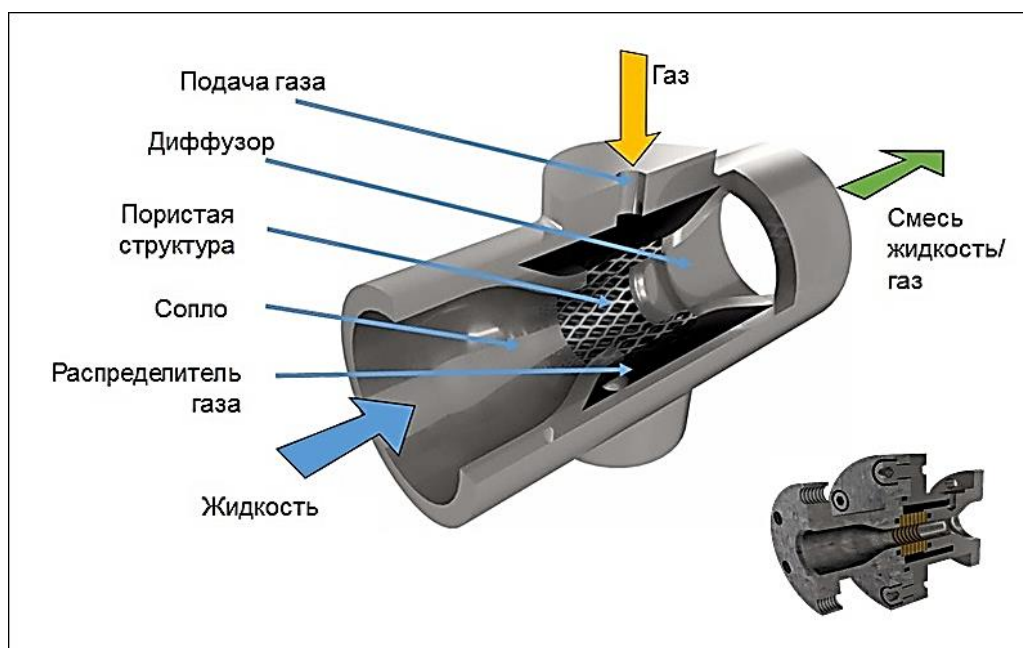


Рисунок 8.6 - Схема цельнометаллического смесителя, созданного по SLM-технологии. Справа внизу: изначальная модель, состоящая из 12 элементов

ОАО «Концерн «Океанприбор» (Санкт-Петербург) производит системы связи для Военно-Морского Флота РФ, в том числе оборудование с большим количеством мелких элементов, например, разветвитель – один из основных компонентов новой гидроакустической антенны. Для быстрого прототипирования при изготовлении литьевых деталей концерн использует профессиональный 3D-принтер, работающий по технологии CJP. На 3D-принтере выращивается литейная форма, которая затем заливается силиконом. В силиконовую форму можно заливать любой другой материал, в данном случае это полиуретан. В результате предприятие получает своего рода форму для форм – не просто прототип, а опытный образец, готовый к использованию. Реализация проекта с применением стандартных методов потребовала бы нескольких месяцев, но благодаря 3D-принтеру срок создания антенны удалось сократить до трех недель (рис. 8.7).



Рисунок 8.6 - Слева: мастер-форма из двух частей, напечатанная на 3D-принтере. Справа: извлечение готовой детали из силиконовой формы

Американская компания Turbine Technologies, Ltd. разработала модификацию двигателей внутреннего сгорания, на которые устанавливаются турбины высокого давления. Компания приобрела принтер для 3D-печати восковых моделей и получает готовую отливку в течение 3-4 дней. Восковые модели теперь изготавливаются непосредственно из 3D-моделей CAD, а литейный цех Turbine Technologies производит компоненты прототипов газотурбинных двигателей с большей точностью и меньшими расходами (рис. 8.7).

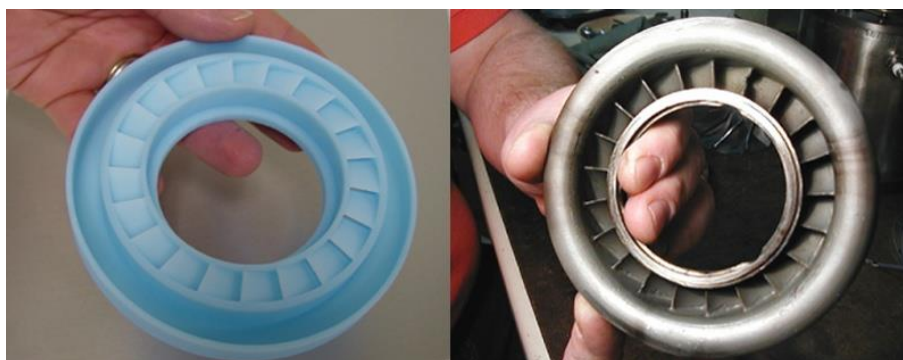


Рисунок 8.7 - Восковая модель, выращенная методом 3D-печати, и готовое изделие

Компания Vaupell разрабатывает производственные решения для литейных предприятий, которые выполняют заказы аэрокосмической и оборонной отрасли. Благодаря стереолитографическому 3D-принтеру компания смогла радикально

повысить эффективность производства. В принтере предусмотрен специальный режим печати фотополимером – QuickCast, при котором воспроизводится тонкостенная внешняя оболочка детали, а пустоты внутри детали заполняются ячеистой структурой. QuickCast-модели заменяют традиционные литейные модели и не требуют дорогостоящей оснастки. Таким образом, компания снизила затраты на литейные модели на 95% (рис. 8.8).



Рисунок 8.8 - 3D-печать фотополимерами по технологии QuickCast позволяет сэкономить время и деньги, поскольку позволяет обойтись без дорогостоящей оснастки

У 3D-технологий есть и сдерживающие факторы. Это и высокая стоимость оборудования и материалов, и недостаточная изученность, и нехватка специалистов, и сложности с интеграцией в традиционные технологические цепочки. Аддитивные методы на сегодня не могут вытеснить или заменить классические технологии, но они доказывают экономическую выгоду при прототипировании и мелкосерийном производстве и становятся единственно возможным решением при изготовлении сложных деталей небольшого размера. В конечном итоге, применение технологий трехмерной печати и моделирования позволяет быстрее выводить новые продукты на рынок, а значит, повышает конкурентоспособность машиностроительных предприятий.

8.5. Производство оснастки в промышленности

Технология RIM (от англ. Reaction Injection Moulding - реакционно-литьевое формование) – технология литья под давлением деталей из ненаполненных полиуретановых композиций, при которой жидкие компоненты на основе высокомолекулярного спирта и изоцианата смешиваются друг с другом в смесительной камере и подаются в заливочную (литьевую) форму, где происходит реакция поликонденсации.

Основным отличием RIM-технологии от известного метода изготовления изделий из термопластов литьем под давлением является то, что в качестве исходного полуфабриката, загружаемого в специализированное оборудование (рис. 8.9), используется не полимерный гранулят, а реакционная смесь, полученная после смешения в заданном соотношении нескольких жидких низкомолекулярных компонентов. Эта смесь подается в литьевую форму, где и происходит химическая реакция взаимодействия компонентов с одновременным образованием готового полимерного изделия. В этом смысле можно сказать, что данная технология подобна известному методу литья под давлением реактопластов. В настоящее время данная технология реализована применительно к изделиям из полиамида.

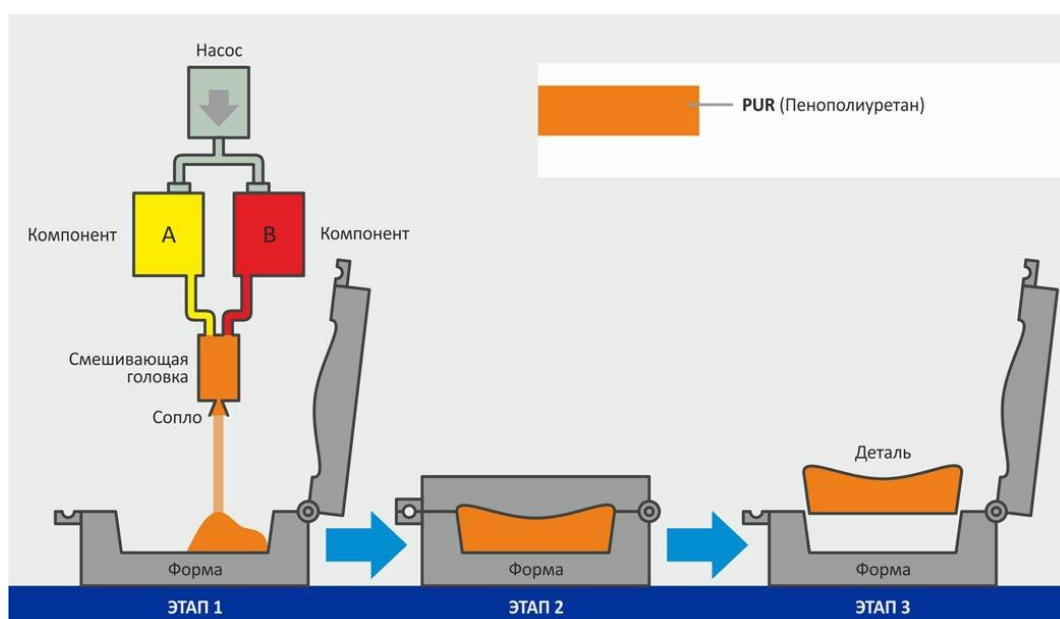


Рисунок 8.9 - Схема технологии RIM

Основным исходным компонентом сырья для RIM-технологии полиамидов служит мономер - капролактam (до 70%), к которому добавляют активатор, катализатор и другие добавки. Таким образом, для изготовления полиамидных изделий по RIM-технологии не требуются дополнительное время и энергозатраты на промежуточные стадии процесса - синтез полимера, гранулирование полимерного материала и неоднократное термическое воздействие на него (сушка, плавление).

Процесс RIM-технологии полиамидов проходит при относительно низких температурах и давлениях. При этом даже толстостенные изделия получают практически с минимальным уровнем остаточных напряжений. Таким способом можно без труда изготавливать полиамидные изделия сложных форм с толщиной стенки до 40...50 мм и габаритами до 1500х2000 мм и более, что является важным преимуществом данной технологии (рис. 8.10).

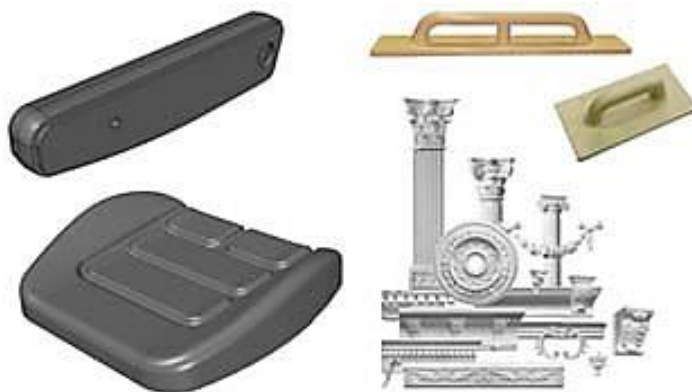


Рисунок 8.10 - Варианты изготавливаемой продукции

Стоимость литевых форм для продукции, изготавливаемой по RIM-технологии, на порядок ниже, чем для подобных изделий, полученных литьем под давлением. Литевые формы более тонкостенные, но требуют обогрева.

Проектирование и изготовление форм для RIM-технологии из модельных материалов может быть осуществлено методами 3D-печати или стереолитографии.

8.6. Аэрокосмические приложения

В производстве авиакосмической техники аддитивные технологии обеспечивают следующие основные преимущества:

1. Стоимость вывода 1 кг массы на орбиту Земли составляет от 12 до 25 тыс. долл. Поэтому возможность снижения массы изделия за счет повышения его конструктивной сложности является весьма актуальной для ракетно-космического машиностроения.

Анализ, проведенный в рамках проекта ATIKINS, показал, что снижение массы магистрального самолета на 100 кг на протяжении всего жизненного цикла влечет за собой экономию \$2,5 млн на топливных расходах и сокращает выбросы углекислого газа на 1,3 млн тонн.

Однако степень усложнения конструкции изделия ограничивается возможностями существующих методов, технологий на их основе и средств технологического оснащения. Так, аддитивные технологии обеспечивают получение системы полостей произвольной формы в теле детали, а субтрактивные — нет. Поэтому в последнем случае приходится использовать дорогостоящие заготовительные технологии с относительно низким уровнем технологической надежности и удорожанием производства из-за брака. В качестве примера рассмотрим одну из основных, лимитирующих деталей газотурбинного двигателя — лопатку турбины (рис. 8.11).



Рисунок 8.11 – Сечения лопатки турбины газотурбинного двигателя

Лопатку с сечениями, формирующими магистраль подачи охлаждающего воздуха, получают литьем по выплавляемым моделям. Отверстия для входа воздуха на передней кромке лопатки изготавливают малопроизводительным электроэрозионным прошиванием с последующей доводкой абразивной суспензией. К настоящему времени созданы опытно-экспериментальные образцы лопаток с применением SLS и SLM — технологий.

2. Коэффициент использования материала (КИМ) при традиционном производстве основных деталей двигателей авиакосмической техники составляет 0,05–0,2. Применение аддитивных технологий позволяет повысить этот коэффициент до 0,7–0,9, что обеспечит значительное сокращение затрат на дорогостоящие материалы. Значение КИМ при изготовлении металлических деталей с применением АТ определяется, главным образом, массой поддержек, подлежащих удалению (рис. 8.12).

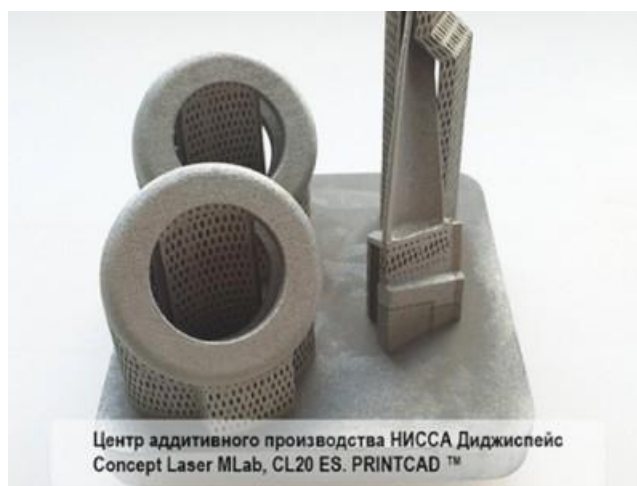


Рисунок 8.12 - Вариант конструкции поддержек соединительного блока

3. Сокращение длительности цикла и стоимости технологической подготовки производства новых изделий имеет первостепенное значение, особенно в опытно-экспериментальном производстве. С развитием АТ опытно-конструкторские организации могут не только осуществлять быстрое натурное моделирование составных частей опытного изделия, но и значительно ускорить как изготовление сложных деталей, так и введение изменений в их конструкции в

процессе доводки и испытаний изделия. Так, по данным ОАО КБХА применение аддитивных технологий при изготовлении 5 основных деталей двигателя позволяет в среднем сократить цикл изготовления в 5 раз.

4. Замена сборочной единицы деталью одного наименования повысит надежность составной части изделия и также сократит цикл ее изготовления. Так, на рисунке 8.12 показан соединительный блок, который при традиционном исполнении представляет собой сборочную единицу, состоящую из 8 наименований деталей.

Аддитивное производство смесительной головки позволяет сократить число наименований деталей с 138 при классической технологии до 1–3 при аддитивном производстве.

5. Основные детали горячей части двигателей современных летательных аппаратов, работающие, как правило, в экстремальных условиях, изготавливают из материалов с низкой обрабатываемостью резанием, поэтому понятен интерес создателей газотурбинных двигателей и жидкостных ракетных двигателей к аддитивным технологиям, позволяющим в ряде случаев снизить трудоемкость и себестоимость технологии. Так, компания GE Aviation часть деталей нового двигателя LEAP производит с применением аддитивных технологий (рис. 8.13).



Рисунок 8.13 - Двигатель LEAP компании GE Aviation

В авиационной промышленности России, имеется опыт практического использования аддитивных технологий, но реальное их применение крайне ограничено.

АО "ОДК-Климов" разрабатывает перспективный вертолетный двигатель (ПДВ), при его изготовлении максимально использована 3D-печать металлами и полимерными конструкционными материалами (рис. 8.14). Представление демонстрационного образца обещано к 2021 году, окончание разработки — к 2025. Ожидается уменьшение массы двигателя на 15% и экономия средств в эксплуатации на 30% по сравнению с существующими аналогами.



Рисунок 8.14 - Сборочный цех АО «ОДК-Климов», сентябрь 2016

АО «ММП имени В.В. Чернышева» входит в состав Объединенной двигателестроительной корпорации и специализируется на производстве и ремонте комплектующих для авиадвигателей. В сотрудничестве с другими предприятиями Корпорации («ОДК-Сатурн», «ОДК-Пермские моторы») завод применяет 3D-печать, осуществляя НИОКР и опытное производство, внедряя образовательные программы и разрабатывая нормативную документацию. В Центре аддитивных технологий компании действует полный лабораторно-исследовательский комплекс

печати из различных сплавов. Предприятие представило несколько практических результатов аддитивного производства:

- завихритель двигателя получил сертификат и будет серийно изготавливаться в «ОДК-Пермские моторы»;
- часть деталей для макета двигателя РД-33МА напечатаны на 3D-принтере;
- корпус топливного насоса с конструкцией, оптимизированной под 3D-печать, будет серийно производиться с 2020 г.

При этом, если в отечественном авиационном двигателестроении есть примеры послойного синтеза опытных образцов готовых изделий, то в производстве самолётов и вертолётостроении аддитивные технологии если и применяются, то в основном при изготовлении технологической оснастки для изготовления элементов конструкции со сложной геометрией поверхности — штампов, пресс-форм и т. п. Примеры же непосредственного послойного синтеза элементов конструкции крайне редки и ограничиваются изготовлением аналогов сварных элементов топливной и гидравлической систем, элементов интерьера и других неотъемлемых деталей.

8.7. Моделирование и создание беспилотных летательных аппаратов

Хорошим примером безальтернативного использования компьютерных методов моделирования (CAD/CAE) и аддитивных технологий является моделирование и создание беспилотных аппаратов как воздушного, так и безвоздушного (то есть космического) и даже подводного базирования.

Примеры успешного применения аддитивных технологий для проектирования и создания беспилотных летательных аппаратов.

Госкорпорация Ростех представила на международной промышленной выставке "Иннопром-2016" в Екатеринбурге первый российский беспилотник-разведчик, который был сделан на 3D-принтере (рис. 8.15).

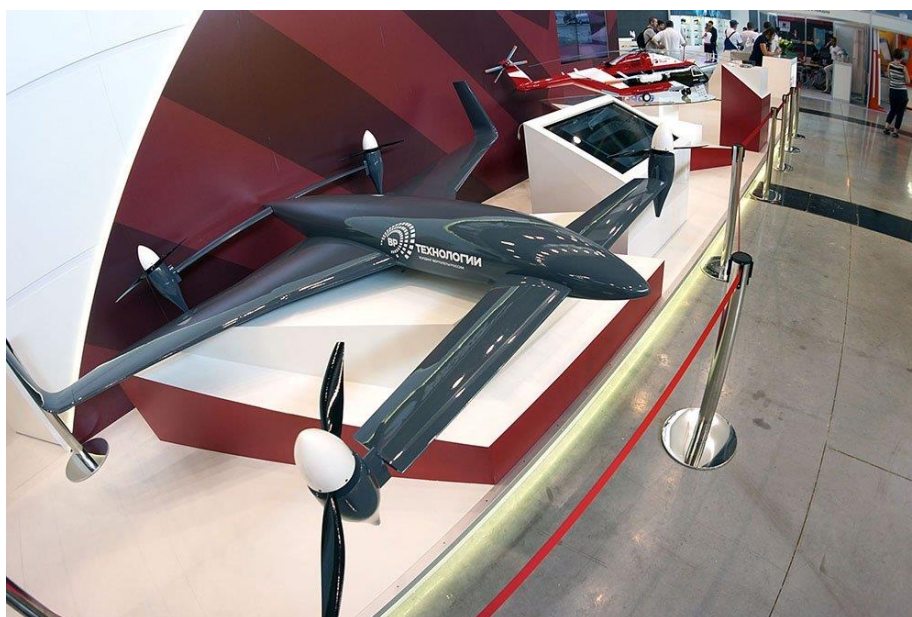


Рисунок 8.15 - Российский беспилотник-разведчик

Беспилотник способен нести на борту видеоаппаратуру и вести работу в радиусе до 50 километров. Он весит менее четырех килограммов, а размах крыла составляет 2,4 метра.

На изготовление такого летательного аппарата тратится около одного дня. Составные части беспилотника перед запуском собираются, как конструктор, в течение 15-20 минут.

Структурное подразделение корпорации «Росатом» компания «РусАТ» разработала и напечатала на 3D-принтере прототип малогабаритного газотурбинного двигателя для беспилотников (рис. 8.16).



Рисунок 8.16 - Газотурбинного двигателя для беспилотных летательных аппаратов

С помощью 3D-печати были созданы 80% конструкции перспективного двигателя. Малогабаритный газотурбинный двигатель можно использовать не только для небольших беспилотных летательных средств, но и для выработки электричества

8.8. Автомобильная индустрия

Аддитивные технологии эффективно решают следующие задачи автомобильного производства:

- создание функциональных прототипов;
- создание выжигаемых и выплавляемых моделей для литья;
- производство оснастки и пресс-форм;
- мелкосерийное производство.

Прототипирование позволит оптимизировать производство тем предприятиям, которые занимаются выпуском автомобилей (но не сборкой готовых моделей), а также производителям автокомпонентов, поставляемых на конвейер.

Средствами топологической оптимизации проектировщик может задать практически любую необходимую геометрию детали и вносить изменения в дизайн на более поздних этапах разработки. 3D-модель передается из САПР на 3D-принтер, который в короткие сроки печатает прототипы, оснастку или пресс-формы для литья изделий. Тем самым сокращаются расходы на производство, сроки разработки продукта и его вывода на рынок. В частности, предприятие может наладить оперативное изготовление компонентов, приурочив его к выпуску автомобиля.

Оснастку и изделия, которые отвечают необходимым прочностным характеристикам, можно выпускать непосредственно на заводе, имея всего лишь один 3D-принтер. Он будет печатать различные по номенклатуре детали, что невозможно при использовании станков и других традиционных инструментов.

Технологии, в основном применяемые для прототипирования:

- FDM (моделирование методом послойного наплавления);
- SLA (лазерная стереолитография);
- SLS (селективное лазерное спекание).

Оснастка и пресс-формы, которые печатаются из пластиков и фотополимерной смолы, будут в разы дешевле металлических.

Изготавливать функциональные изделия можно и на металлических 3D-принтерах (например, по SLM-технологии). 3D-печать металлом также подходит при выпуске небольших партий, в том числе при создании кастомизированных продуктов. Новейшие разработки в области металлических порошков открыли путь к изготовлению более легких, более плотных, а в отдельных случаях – более прочных деталей. Благодаря топологической оптимизации на 3D-принтере можно выращивать компоненты сложной формы и фактуры (с ячеистой структурой, внутренними каналами и т.п.), в том числе цельнометаллические, которые раньше собирались из нескольких элементов.

3D-печать позволяет получить производителям автомобилей и автокомпонентов целый ряд преимуществ:

- сокращение времени на этапе разработки продукта и литья;
- экономия времени и расходов на изготовление оснастки и пресс-форм;
- отказ от услуг подрядчиков-изготовителей оснастки;
- проведение технологических экспериментов и функциональное тестирование;
- создание геометрически сложных изделий с мелкими деталями, которые невозможно изготовить традиционными методами;
- снижение массы детали и экономия используемых материалов за счет топологической оптимизации;
- ускорение выпуска нового продукта или эксклюзивной серии на рынок.

Примеры успешного применения аддитивных технологий в автомобильной индустрии.

Одной из первых компаний, «обкатывающих» 3D-принтеры в серийном производстве стала японская Toyota, разработавшая концепт uBox. В его создании принимал участие Международный центр исследований в области автомобильных технологий Университета Клемсона (Южная Каролина). Главная особенность uBox заключается в том, что модульный интерьер и вся электронная начинка распечатаны на 3D-принтере (внешние детали и рама по-прежнему изготавливаются при помощи традиционных технологий (рис. 8.17)).



Рисунок 8.17 – Автомобиль Toyota iBox

По словам Toyota, главная идея этого автомобиля – наличие возможности максимальной кастомизации интерьера. Возможно, именно поэтому японцы позиционируют его, как «персонализируемую машину будущего для поколения Z». Toyota уже заявила о планах по созданию специального онлайн ресурса для владельцев iBox, где они смогут делиться вариантами дизайна дверных накладок, приборной панели, вентиляционных отверстий и пр.

Автомобиль The Blade принято считать «первым в мире напечатанным суперкаром». Корпус автомобиля выполнен из углеволокна, а внутри него находится множество алюминиевых трубок – все это прикреплено к шасси автомобиля для снижения веса и увеличения безопасности. За разработку The Blade ответственна компания Divergent3D, одной из главных целей которой является продвижение инновационных технологий автопрома, делающих автомобили более легкими, а их производство – экономичнее (рис. 8.18).



Рисунок 8.18 - Автомобиль The Blade

EDAG Group – это один из крупнейших независимых разработчиков в автомобильной индустрии. Данная организация занимается упрощением и оптимизацией технологий производства автомобилей, и главная предназначение концепта Light Cooon аналогична вышеупомянутому The Blade – а именно, доказать возможность создания более легких ТС, без увеличения расходов на производство и сборку компонентов (рис.8.19).



Рисунок 8.19 – Автомобиль EDAG Light Cooon

Строение корпуса EDAG Light Cooon похоже на лист: панели имеют пористую структуру для обеспечения низкого веса, а чтобы оставить безопасность автомобиля на прежнем уровне, корпусные панели пронизаны тонкими нитями прочной сверхлегкой ткани Jack Wolfskin. Помимо того, что пористая структура более удобна именно для 3D-печати, она позволяет осуществлять различные световые эффекты для демонстрации «скелетообразного» строения автомобиля.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От чего зависит выбор технологии создания прототипа.
2. Перечислите группы, на которые можно разбить варианты конструкторского применения прототипов.
3. Для чего применяют построение моделей в архитектуре?
4. Приведите примеры применения аддитивных технологий в машиностроении.
5. Опишите технологию реакционно-литьевого формования.
6. Какими методами могут быть спроектированы и изготовлены формы для RIM-технологии.
7. Перечислите основные преимущества применения аддитивных технологий в производстве авиакосмической техники.
8. Приведите пример применения аддитивных технологий для проектирования и создания беспилотных летательных аппаратов.
9. Какие задачи автомобильного производства решают аддитивные технологии.
10. Приведите пример применения аддитивных технологий в автомобильной промышленности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кулик, В.И., Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники: учебное пособие / В.И. Кулик, А.С. Нилов; Балт. гос. техн. ун-т. - СПб., 2018. - 160 с.
2. Хейфец, М.Л., д.т.н., проф. Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь, Алгоритмы процессов послойного синтеза изделий сложной формы из композиционных материалов // Процессы механической обработки в машиностроении. — 2009. — №7. — С. 257-273.
3. Шкуро, А.Е., Технологии и материалы 3D-печати: учеб. пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногое. - Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – 101 с.
4. Шишковский, И. В., Основы аддитивных технологий высокого разрешения. — СПб.: Питер, 2016. — 400 с.
5. Панков, Д. Э. Лазерная стереолитография (SLA): технология 3D-печати / Д. Э. Панков, И. А. Соломонов, А. М. Терин, А. К. Тутушкин. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2020. — № 48 (338). — С. 48-49. — URL: <https://moluch.ru/archive/338/75621/>
6. Франке, Й. 3D-MID. Материалы, технологии, свойства. Пер. с англ. под ред. И. Волкова. – СПб.: Профессия, 2014. – 336 с. Ссылка на текст: https://studref.com/554661/tehnika/3d-mid_materialy_tehnologii_svoystva
7. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения
8. ГОСТ Р 57586-2017 Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования
9. Сайт компании iQB Technologies - Российского дистрибутора ведущих мировых производителей 3D-принтеров, 3D-сканеров, ПО и расходных материалов. Ссылка на сайт: <https://iqb.ru/about-us/>