

Владимирский государственный университет

Л. В. БЕЛЯЕВ А. В. АБОРКИН

# ВВЕДЕНИЕ В АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Владимир 2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Л. В. БЕЛЯЕВ А. В. АБОРКИН

# ВВЕДЕНИЕ В АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

*Допущено Федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 15.00.00 «Машиностроение» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлению подготовки бакалавриата, магистратуры в группе специалитета 15.00.00 «Машиностроение»*



Владимир 2023

УДК 621.9 : 004.9

ББК 34.5-5-05

Б44

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, доцент  
проректор по научной работе и цифровому развитию  
Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
*А. О. Кучерик*

Кандидат технических наук, член-корреспондент Российской академии  
ракетных и артиллерийских наук, советник генерального директора  
Всероссийского научно-исследовательского института «Сигнал»  
*С. И. Филиппов*

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

**Беляев, Л. В.** Введение в аддитивные технологии : учеб.  
Б44 пособие / Л. В. Беляев, А. В. Аборкин ; Владим. гос. ун-т им.  
А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2023. – 248 с.  
ISBN 978-5-9984-1796-2

Рассмотрены основы аддитивного производства и дано описание основных принципов аддитивных технологий, показана ретроспектива их появления. Описаны терминология и классификация аддитивного формообразования. Представлены основные принципы и этапы аддитивного производства прототипов и функциональных образцов промышленных изделий различного назначения, освещены вопросы, связанные с подготовкой аддитивного производства, а также особенностями проектирования изделий для их получения на основе аддитивных технологий.

Разработано в соответствии с государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования и предназначено для студентов вузов, обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлению подготовки бакалавриата, магистратуры в группе специалитета 15.00.00 «Машиностроение».

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Ил. 163. Табл. 13. Библиогр.: 66 назв.

УДК 621.9 : 004.9

ББК 34.5-5-05

ISBN 978-5-9984-1796-2

© ВлГУ, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 7  |
| Глава 1. ИСТОРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОЯВЛЕНИЯ<br>АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ .....                | 9  |
| Контрольные вопросы.....  | 23 |
| Глава 2. ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ПРОЦЕССЕ<br>АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА .....                 | 24 |
| 2.1. Сущность процесса, термины и определения .....                                       | 24 |
| 2.2. Классификация аддитивных технологий .....  | 31 |
| 2.3. Категории построения изделий на основе аддитивных<br>технологий.....                 | 39 |
| 2.3.1. Экструзия материала.....   | 39 |
| 2.3.2. Струйное распыление основного материала.....                                       | 41 |
| 2.3.3. Струйное распыление связующего материала.....                                      | 44 |
| 2.3.4. Листовое ламинирование.....  | 46 |
| 2.3.5. Фотополимеризация в ванне .....  | 48 |
| 2.3.6. Сплавление порошкового материала в заранее<br>сформированном слое.....             | 50 |
| 2.3.7. Осаждение материала с помощью прямого подвода<br>энергии .....                     | 53 |
| 2.3.8. Гибридные технологии БПИ .....   | 54 |
| Контрольные вопросы.....  | 55 |
| Глава 3. МЕТОДЫ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ .....   | 57 |
| 3.1. Методы фотополимеризации.....  | 57 |
| 3.1.1. Векторно-сканирующее отверждение .....   | 57 |
| 3.1.2. Отверждение проецированием.....  | 60 |
| 3.1.3. Печать с фотохимическим отверждением.....  | 62 |
| 3.1.4. Механизм фотополимеризации.....  | 63 |
| 3.1.5. Взаимодействие актиничного излучения<br>с фотополимеризующимися композициями ..... | 65 |



|  |     |
|--|-----|
| 3.1.6. Погрешности, возникающие в процессе фотополимеризации .....   | 67  |
| 3.1.7. Стратегии формирования сечений .....  | 70  |
| 3.1.8. Нанесение фотополимеризующейся композиции .....   | 76  |
| 3.2. Методы слияния порошковых оснований .....   | 80  |
| 3.2.1. Механизмы слияния частиц порошков .....   | 81  |
| 3.2.2. Селективное лазерное спекание .....   | 87  |
| 3.2.3. Электронно-пучковое плавление .....   | 89  |
| 3.2.4. Селективное спекание с послойной схемой формирования .....  | 92  |
| 3.2.5. Нанесение слоев порошкового материала .....   | 95  |
| 3.2.6. Косвенное формирование изделий .....  | 98  |
| 3.3. Методы листового ламинирования .....  | 100 |
| 3.3.1. Технология изготовления объектов методом ламинирования .....  | 100 |
| 3.3.2. Технология бумажного ламинирования .....  | 104 |
| 3.3.3. Способы листового ламинирования «форма – закрепление» .....   | 105 |
| 3.3.4. Ультразвуковая консолидация .....   | 110 |
| 3.4. Методы послойной экструзии .....  | 112 |
| 3.4.1. Моделирование методом послойного наплавления .....  | 112 |
| 3.4.2. Типы кинематических схем установок аддитивного производства, основанных на FDM-технологии получения изделий ..... | 114 |
| 3.4.3. Экструдеры для FDM-принтеров .....  | 119 |
| 3.4.4. Поддерживающие структуры .....  | 129 |
| 3.4.5. Материалы для процесса моделирования методом послойного наплавления .....   | 131 |
| 3.4.6. Альтернативные FDM-методы послойной экструзии .....   | 146 |
| 3.5. Методы послойного синтеза печатью .....   | 151 |
| 3.5.1. Синтез баллистическими частицами .....  | 152 |
| 3.5.2. Трехмерная печать .....   | 153 |
| 3.5.3. Трехмерная аэрозольная печать .....   | 160 |
| 3.6. Методы послойной наплавки .....   | 164 |
| 3.6.1. Способы подачи строительного материала .....  | 165 |
| 3.6.2. Параметры процесса послойной лазерной наплавки .....  | 167 |
| 3.6.3. Технологии послойной лазерной наплавки .....  | 168 |
| Контрольные вопросы .....  | 171 |

|  |     |
|--|-----|
| Глава 4. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА .....  | 172 |
| 4.1. Структура технологического процесса послойного синтеза .....  | 172 |
| 4.1.1. Этап подготовки цифровой модели изделия.....  | 173 |
| 4.1.2. Этап подготовки процесса послойного синтеза .....   | 182 |
| 4.1.3. Этап формирования изделий .....   | 184 |
| 4.1.4. Этап постобработки изделий.....   | 184 |
| 4.2. Преимущества и недостатки послойного синтеза .....  | 185 |
| 4.3. Распространенные приемы повышения эффективности<br>процессов послойного синтеза .....                       | 187 |
| 4.3.1. Формирование изделий с адаптивной толщиной слоя.....  | 188 |
| 4.3.2. Формирование изделий с аппроксимацией высших<br>порядков.....   | 191 |
| 4.3.3. Разнонаправленное рассечение .....  | 192 |
| Контрольные вопросы.....   | 194 |
| <br>   |     |
| Глава 5. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ<br>ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТОДАМИ БПИ .....                               | 195 |
| 5.1. Использование технологий БПИ для повышения ценности<br>изготавливаемого продукта .....                      | 197 |
| 5.2. Общие правила по проектированию изделий<br>для их изготовления на основе технологий БПИ.....                | 197 |
| 5.2.1. Правило № 1. Учет конструктивных особенностей изделия<br>и технологических возможностей оборудования..... | 197 |
| 5.2.2. Правило № 2. Оценка целесообразности применения<br>технологий БПИ.....                                    | 198 |
| 5.2.3. Правило № 3. Учет эстетических требований к изделию .....   | 199 |
| 5.2.4. Правило № 4. Отсутствие острых кромок.....  | 200 |
| 5.2.5. Правило № 5. Учет ориентации модели на платформе<br>построения .....                                      | 200 |
| 5.2.6. Правило № 6. Минимизация количества используемого<br>материала .....                                      | 201 |
| 5.2.7. Правило № 7. Минимизация объема материала<br>«поддержки».....   | 202 |
| 5.3. Проектирование конструкций, позволяющих избежать<br>анизотропии.....  | 202 |
| 5.4. Экономический аспект аддитивного производства.....  | 204 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.5. Конструирование с целью минимизации времени изготовления.....  | 210 |
| 5.6. Проектирование с учетом минимизации последующей обработки..... | 214 |
| 5.7. Выбор конструкционного материала.....                          | 227 |
| 5.8. Оптимизация топологии и решетчатые структуры .....             | 228 |
| 5.9. Консолидация деталей в сборке .....                            | 231 |
| Контрольные вопросы.....  | 236 |
| <br>  |     |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....  | 238 |
| <br>  |     |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....                                       | 239 |
| <br>  |     |
| ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.....  | 245 |

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение производительности – актуальная проблема отечественного машиностроения. Наиболее распространенный путь решения данной задачи – использование различных систем автоматизации инженерной деятельности. Сокращение длительности конструкторской и технологической подготовки производства как этапов жизненного цикла изделия способствует радикальному снижению производственных затрат. Однако помимо решения вопросов создания технической документации конструкторско-технологическая подготовка производства требует оперативного изготовления единичных физических моделей изделий, таких как прототипы для оценки свойств проектируемых объектов, модельной оснастки для процессов литья и пр. Для успешного решения подобных задач в настоящее время все более активно используются совершенно новые технологии производства изделий, получившие название «аддитивные технологии».

Данные технологии основаны на прямом производстве изделий на основе их трехмерных цифровых моделей и не требуют наличия дополнительной технологической оснастки, а основным принципом производства готового изделия является добавление, а не удаление материала. На основе данных о виртуальных моделях твердых тел можно изготавливать их физические модели за несколько часов. При этом отличительной особенностью аддитивных технологий от классических методов формообразования следует считать значительное сокращение времени и материальных ресурсов на подготовку производства, так как изготовление изделия происходит за одну технологическую операцию, что снижает трудоемкость подготовки производства по сравнению с классическими многооперационными технологиями.

Книга посвящена описанию основных принципов аддитивных технологий. Для этого рассмотрен широкий круг вопросов: от исторических аспектов формирования концепции аддитивного производства до ее современной технологической реализации. Описаны основные этапы аддитивного производства прототипов и функциональных образцов промышленных изделий различного назначения.

Учебное пособие может представлять интерес как для студентов высших учебных заведений, так и инженерно-технических работников, изучающих новые технологии производства изделий.

## Глава 1. ИСТОРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОЯВЛЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Предшественниками современных аддитивных технологий считают две оригинальные технологии [1], появившиеся в XIX в. В 1890 г. Josef E. Blather предложил способ изготовления топографических макетов – трехмерных карт поверхности местности. Суть метода заключалась в следующем: из тонких восковых пластин по контурным линиям топографической карты вырезались фрагменты, соответствующие воображаемому горизонтальному сечению объекта, затем эти пластины укладывались одна на другую в определенном порядке и склеивались (рис. 1.1).

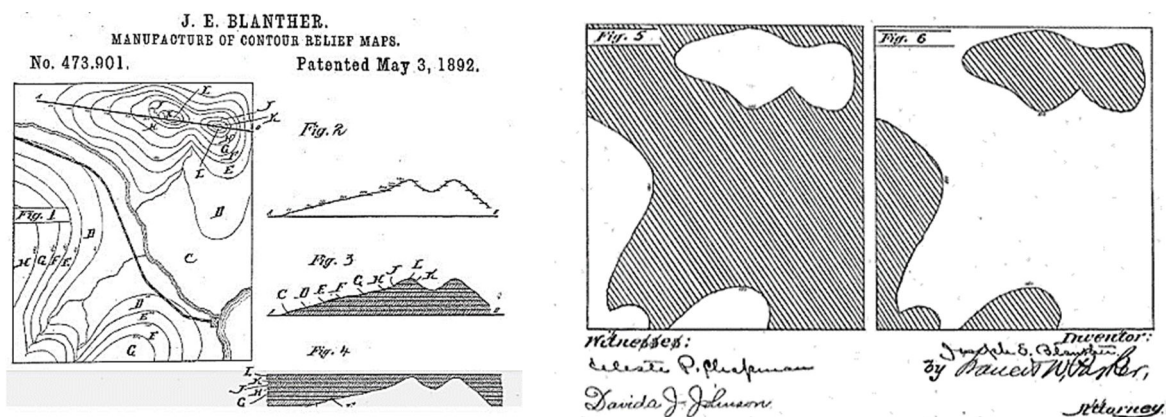


Рис. 1.1. Технология J. E. Blathera. Патент США № 473901, выдан в 1892 г.

Получался «последовательный синтез» холма или оврага. После этого поверх полученных фигур накладывали бумагу и формировали макет отдельного элемента ландшафта, который затем уже в «бумажном» виде располагали в соответствии с исходной картой.

Вторая технология – фотоскульптура (Photosculpture) [2] – была предложена французом François Willème в 1859 г. (рис. 1.2). Суть ее состояла в следующем: вокруг объекта или субъекта располагали фотокамеры (Willème использовал 24 камеры с шагом 15 градусов) и производили одномоментное фотографирование на все камеры. Затем каждое изображение проецировали на полупрозрачный экран, и оператор с помощью пантографа обрисовывал контур. Пантограф был связан с режущим инструментом, который удалял модельный материал – глину – в соответствии с профилем текущего контура.

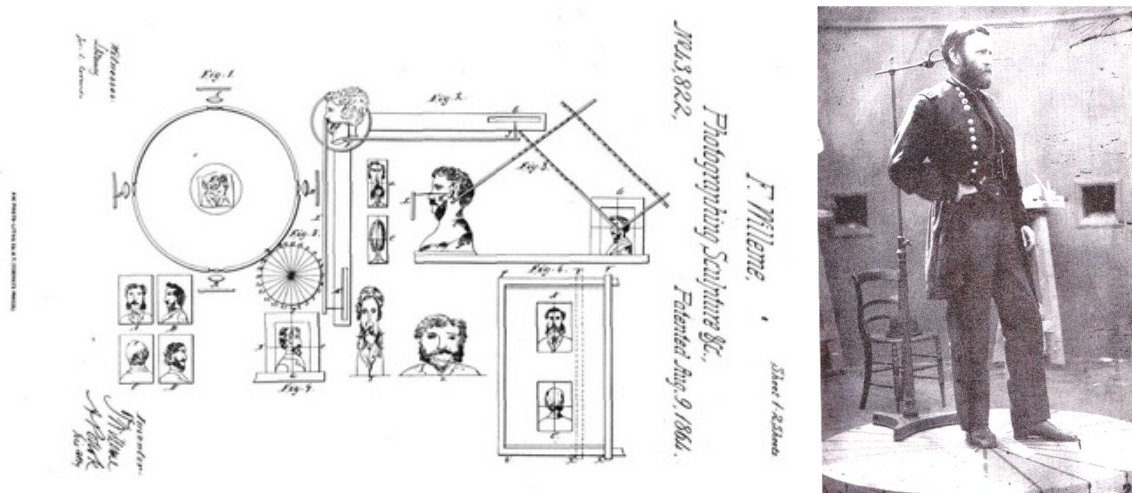


Рис. 1.2. Фотоскульптура по технологии François Willème.  
 Патент США № 43822, выдан в 1859 г.

Для уменьшения трудоемкости процесса Willème немец Carlo Baese в 1904 г. предложил использовать фоточувствительный желатин, который при обработке водой расширяется в зависимости от степени засветки – экспозиции (рис. 1.3).

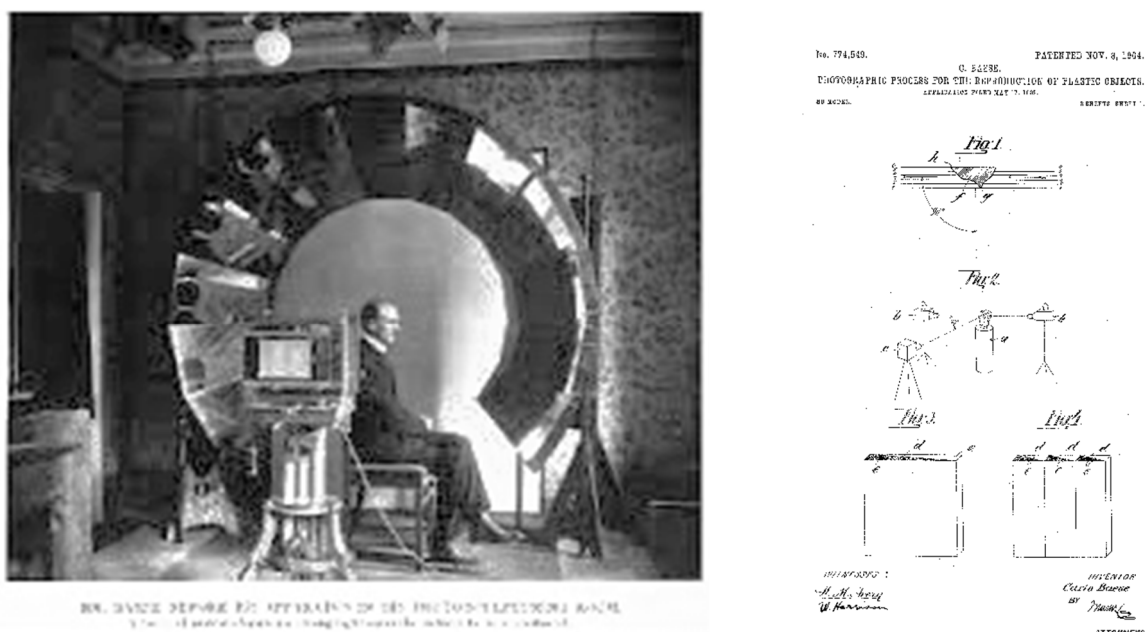


Рис. 1.3. Фотоскульптура по технологии Carlo Baese (модельный материал – фоточувствительный желатин). Патент США № 774549, выдан в 1904 г.

В 1935 г. Isao Morioka предложил способ, сочетающий в себе топографию и фотоскульптуру (рис. 1.4). Способ предполагал использование структурированного света (сочетание черных и белых полос)



для создания топографической «карты» объекта – набора контуров. Контурные затем вырезались из листового материала, укладывались в определенном порядке и таким способом формировался трехмерный образ объекта или же, как и у François Willème, контуры могли быть спроецированы на экран для дальнейшего создания трехмерного образа с помощью режущего инструмента.

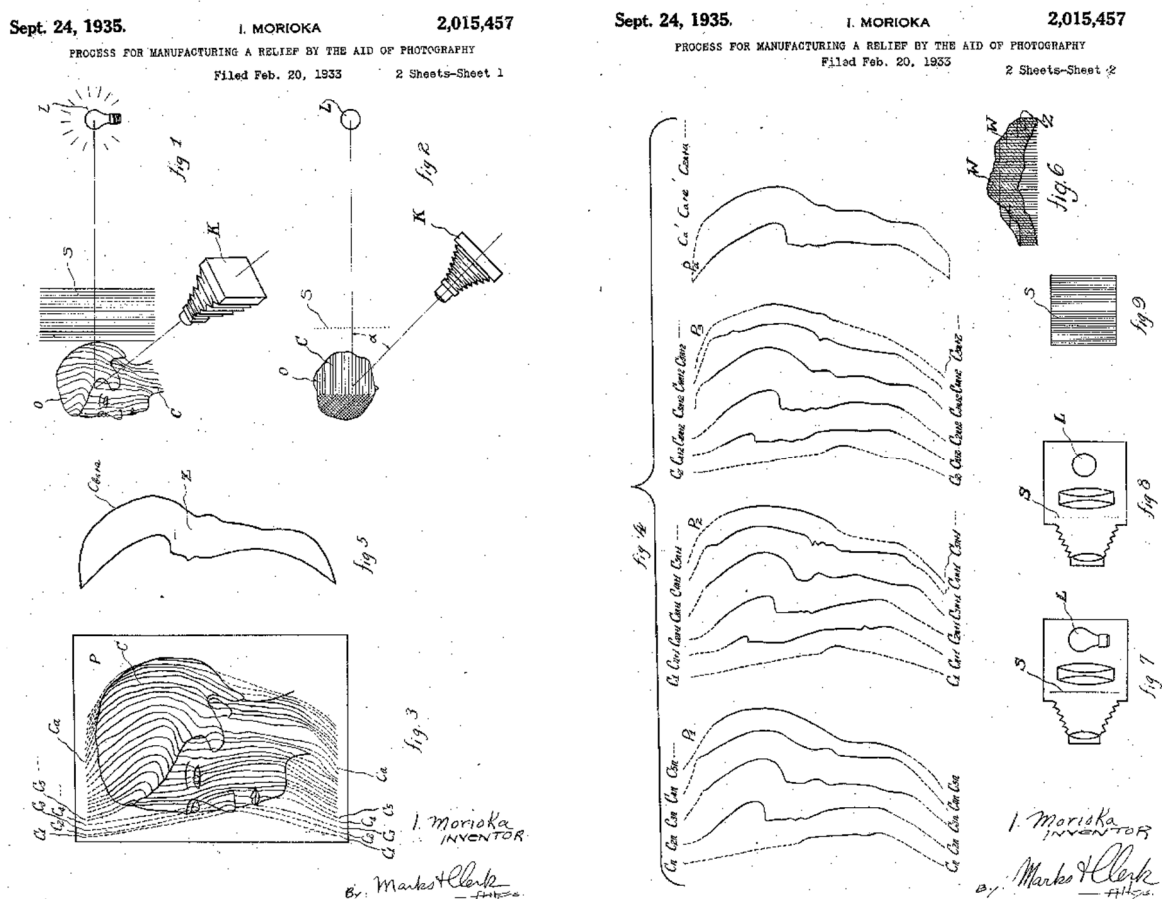


Рис. 1.4. Способ создания рельефа с помощью фотографии по технологии Isao Morioka. Патент США № 2015457, выдан в 1935 г.

Первым приближением к стереолитографии в современном понимании стала идея Otto Munz (1956 г.), который предложил способ селективной (послойной) экспозиции прозрачной фотоэмульсии. На этот слой проецировался контур (сечение) объекта. В качестве платформы, на которой производилась экспозиция, использовался поршень, установленный в цилиндре с возможностью перемещения. Поршень перемещали на определенную величину (т. е. с определенным шагом) и сверху наносили слой эмульсии, проецируя на него

изображение, после чего наносили слой фиксирующего реагента. И так каждый фрагмент построения детали: поршень перемещали вниз, наносили фотоэмульсию, засвечивали, наносили слой фиксирующего реагента и т. д. Фиксирующий состав наносился на весь слой – и на засвеченные, и на незасвеченные участки, в результате внутри затвердевшего прозрачного материала, сформированного в виде цилиндра, был заключен образ трехмерного объекта (рис. 1.5). На патент Otto Munz, как на предшественника современной стереолитографии ссылаются практически все авторы новых изобретений в области аддитивных технологий.

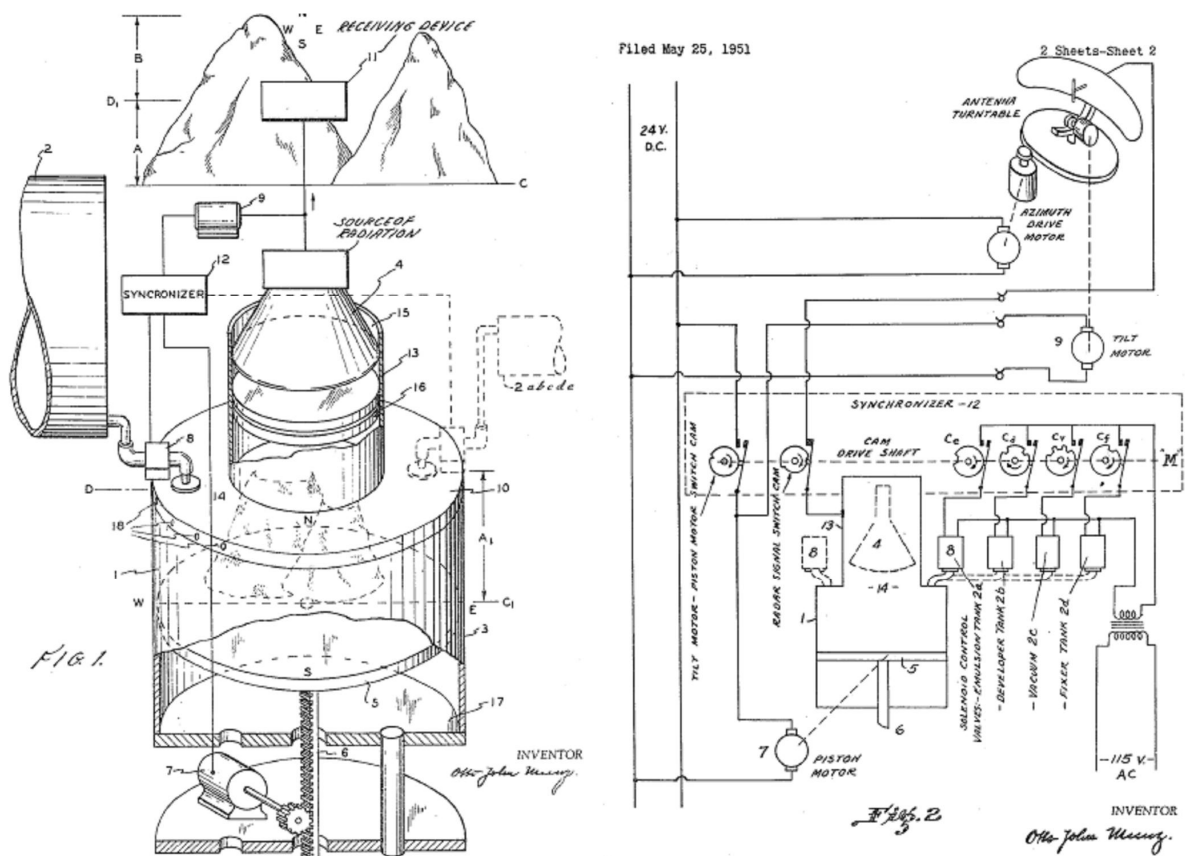


Рис. 1.5. Иллюстрация к патенту: Otto John Munz, Photo-Glyph recording.  
Патент США № 2775758, выдан в 1956 г.

В 1977 г. Wyn Kelly Swainson предложил способ получения трехмерных объектов посредством отверждения фоточувствительного полимера в точке пересечения двух лазерных лучей. Примерно в это же время (1972 г.) французский ученый Pierre Ciraud начинает эксперименты по разработке технологии послойного синтеза из порошковых материалов (рис. 1.6).

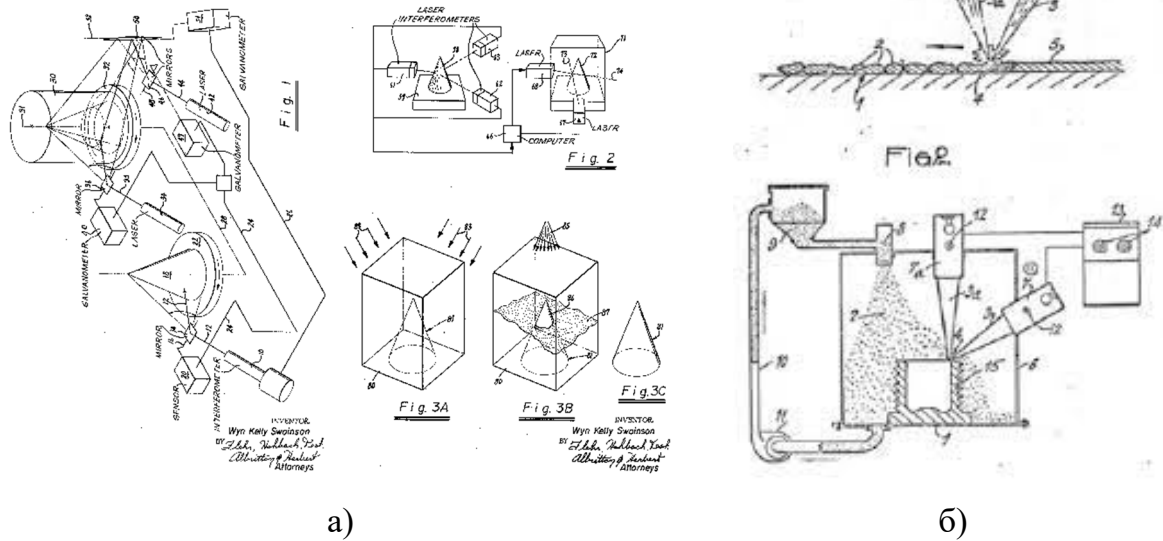


Рис. 1.6. Иллюстрация к патенту: а – Wyn Kelly Swainson. Патент США № 4041476, выдан в 1977 г.; б – Р. А. Ciraud. Патент ФРГ № 2263777, выдан в 1972 г.

Практическое применение идея, заложенная J. E. Vlanther, нашла в Lamination Object Manufacturing – LOM-технологии: послойном ламинировании или склеивании тонких листовых материалов, толщина листов при этом составляет 0,051 – 0,25 мм. В 1979 г. профессор Nakagawa из Токийского университета предложил использовать эту технологию для быстрого изготовления пресс-форм, в частности, со сложной геометрией охлаждающих каналов (рис. 1.7).

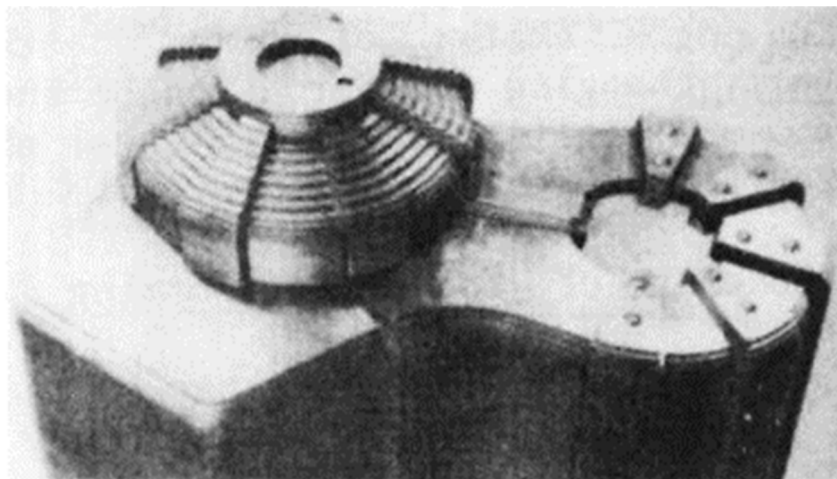


Рис. 1.7. Пример пресс-формы, полученной профессором Nakagawa

В 1981 г. R. F. Housholder предложил способ формирования тонкого слоя порошкового материала нанесением его на плоскую плат-

форму. Далее производилось разравнивание до определенной величины по высоте с последующим спеканием слоя (рис. 1.8).

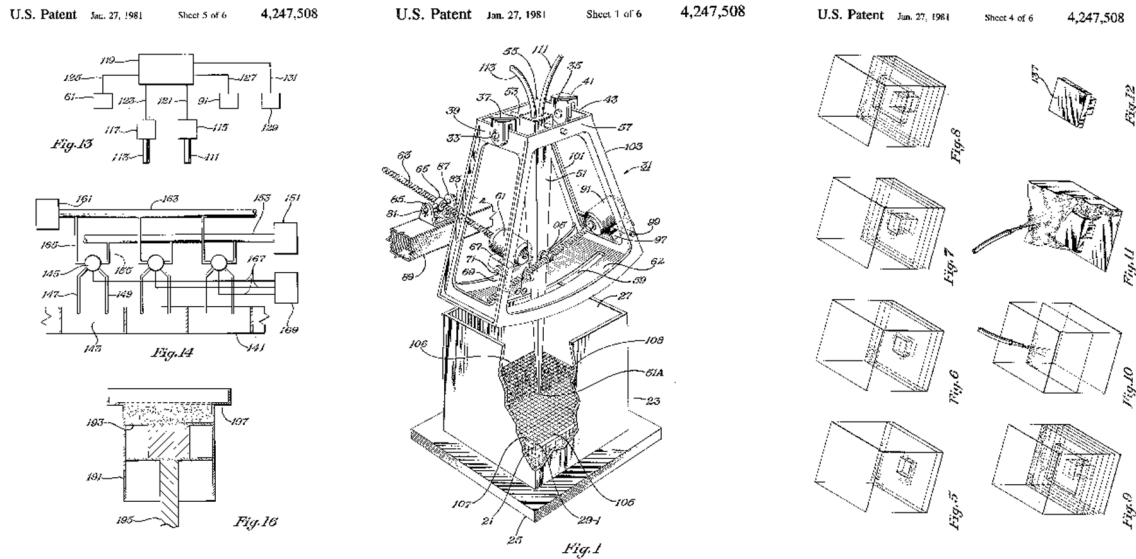


Рис. 1.8. Иллюстрация к патенту: R. F. Housholder. Патент США № 4247508, выдан в 1981 г.

В том же 1981 г. Нидео Kodama опубликовал результаты работы с первых функциональных систем фотополимеризации с помощью ультрафиолетовой (УФ) лампы и лазера. В 1982 г. была опубликована работа А. J. Herbert по созданию трехмерных моделей с помощью X-Y-плоттера, УФ-лампы и системы зеркал (рис. 1.9) [2].

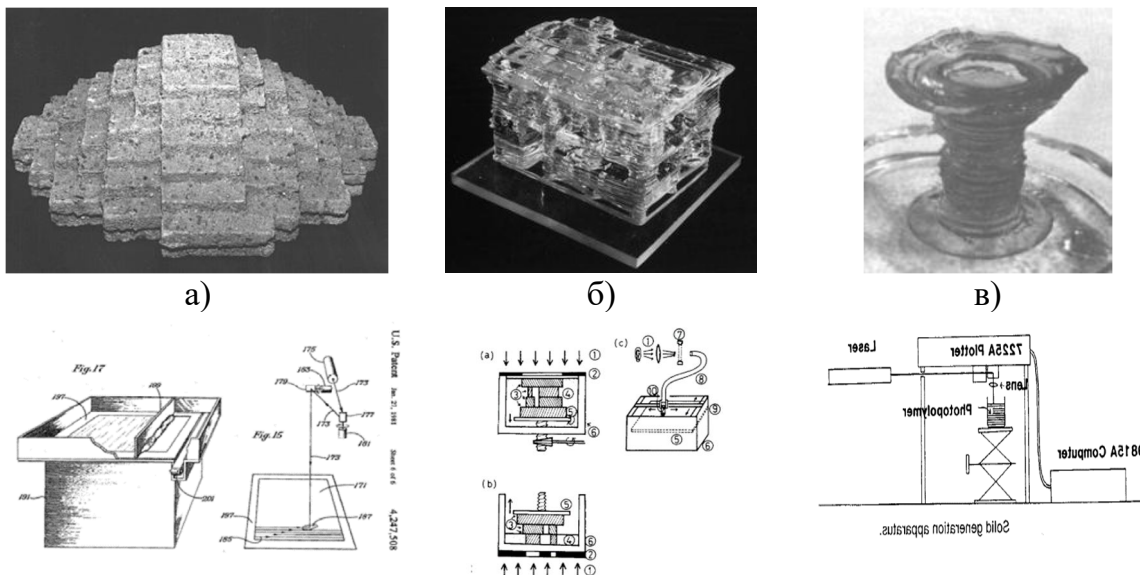


Рис. 1.9. Образцы моделей из фотополимеров, полученные R. F. Housholder (а), Н. Kodama (б) и А. J. Herbert (в) соответственно, и технологические схемы, используемые при построении

Процесс патентования новых технических решений по аддитивным технологиям приобрел лавинообразный характер. В 1986 г. Charles W. Hull предложил способ послойного синтеза посредством УФ-излучения, сфокусированного на тонкий слой фотополимерной смолы (рис. 1.10).

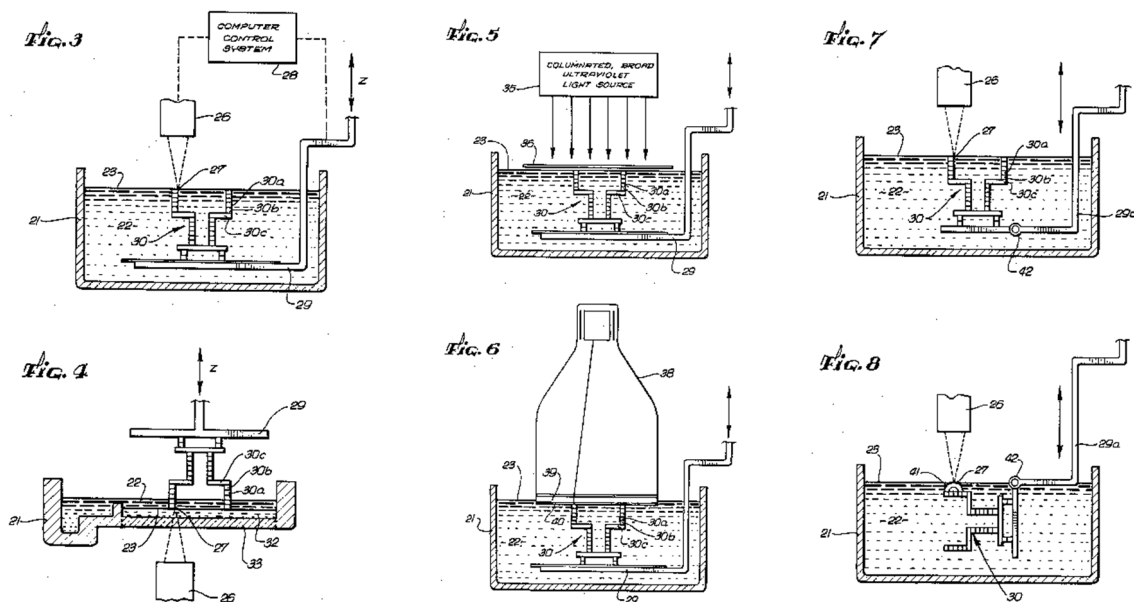


Рис. 1.10. Иллюстрация к патенту: Charles W. Hull. Патент США № 4575330, выдан в 1986 г.

Представленный способ был реализован на первой в мире установке аддитивного производства SLA-1 (рис. 1.11), которая сейчас выставлена в Национальном музее славы изобретателей в Александрии (Вирджиния, США). Charles W. Hull ввел в оборот термин «stereolithography» (SLA) – «стереолитография». Charles W. Hull стал основателем фирмы 3D Systems – компании, первой приступившей к коммерческой деятельности в области послойного синтеза. В 1988 г. впервые было начато коммерческое использование данной технологии.



С этого момента началась новая эпоха в индустрии – эпоха аддитивных технологий. Это дало толчок к развитию других технологий аддитивного производства, использующих схожий принцип построения

Рис. 1.11. Внешний вид установки аддитивного производства SLA-1

изделия, но другие материалы и принципы создания конечного продукта. Стали появляться коммерческие фирмы, занимающиеся разработкой и внедрением данных технологий в производство.

Основанная в 1986 г. израильская компания Cubital Ltd разработала и представила на рынок оборудование, работающее по технологии Solid Ground Curing (SGC) – масочная стереолитография (рис. 1.12).

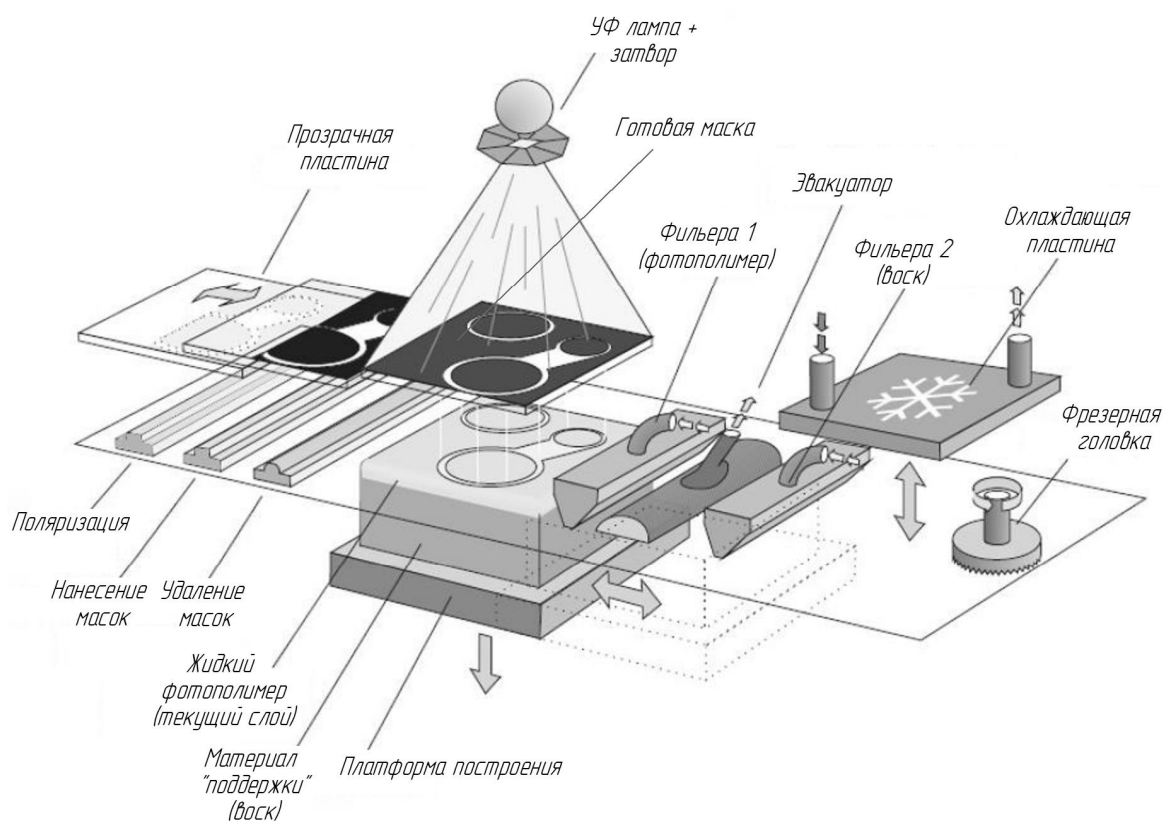


Рис. 1.12. Схема SGC-процесса, разработанного фирмой Cubital

Компания Cubital прекратила свое существование, но интеллектуальные права были сохранены компанией Objet Geometries Ltd, а в 2012 г. перешли к корпорации Stratsasys в результате слияния двух компаний. В связи с этим вариант технологии SGC, используемый на установках конкурирующей компании 3D Systems, известен под названием Film Transfer Imaging, или FTI.

В 1989 г. была разработана и запатентована технология аддитивного производства, получившая название Selective Laser Sintering (SLS), (рис. 1.13) – селективное лазерное спекание. Это метод аддитивного производства, который заключается в спекании мелкодисперсного порошкового (обычно металлического) материала с помо-

щью лазера. Технология селективного лазерного спекания была разработана и запатентована в результате совместной работы доктора Карла Декарда (Dr. Carl Deckard) и его научного руководителя доктора Джо Бимана (Joe Beaman) в Техасском университете в Остине при поддержке Агентства по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам США [3]. Декард и Биман участвовали в создании компании для продвижения технологии селективного лазерного спекания на рынок, однако фирма была выкуплена в 2001 г. конкурентами – компанией 3D Systems [4]. Созданная в 1989 г. фирма Electro Optical System (EOS GmbH) представила в 1990 г. первую установку EOS Stereos system, работавшую на основе запатентованной технологии.

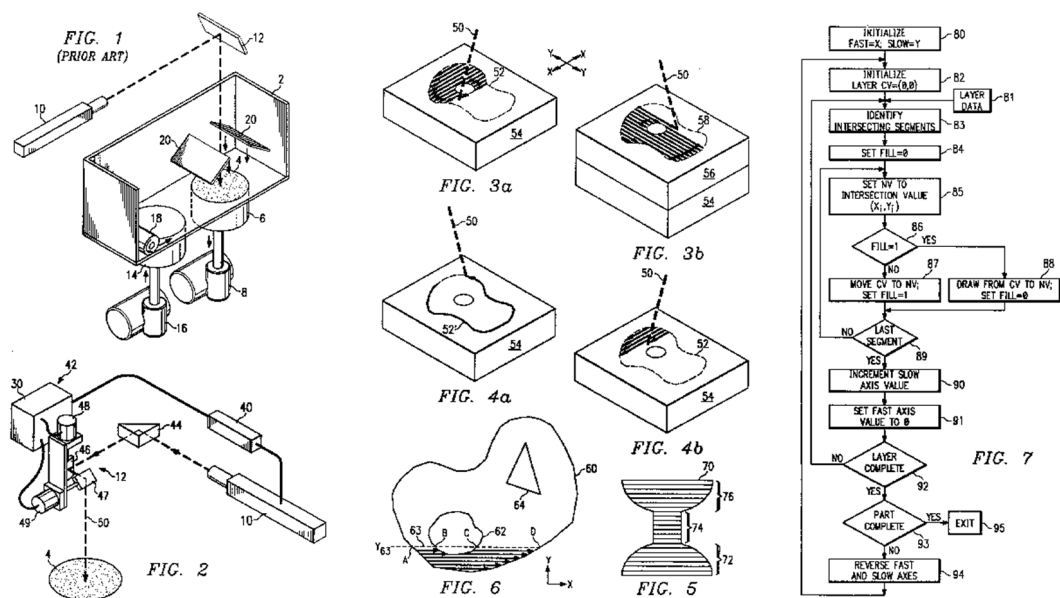


Рис. 1.13. Иллюстрация к патенту: Carl R. Deckard, Joseph J. Beaman, James F. Darrah. Патент США № 5155324, выдан в 1989 г.

В 1992 г. впервые было начато коммерческое использование установки аддитивного производства на основе технологии стереолитографии SLA-250. Установка была оснащена гелиево-кадмиевым лазером, имела зону построения 250×250×250 мм (рис. 1.14).

В том же 1992 г. С. Скоттом Крампом (S. Scott Crump), сооснователем фирмы Stratasys (США), была разработана и запатентована одна из наиболее широко используемых на сегодняшний день технологий аддитивного производства – Fused Deposition Modeling (FDM) – моделирование методом послойного наплавления.



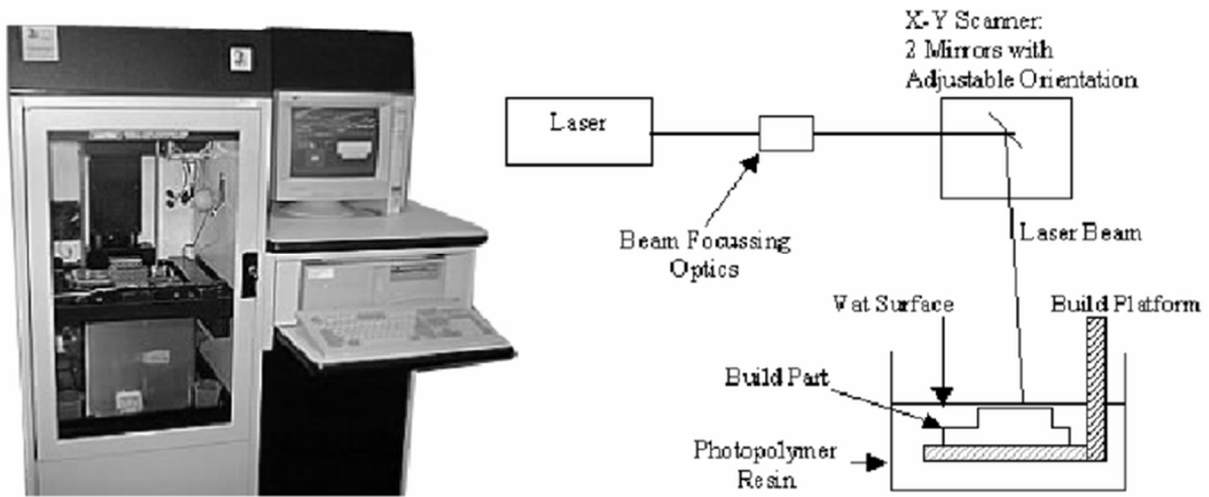


Рис. 1.14. Внешний вид установки аддитивного производства SLA-250 и схема процесса построения изделия

Широкая популярность применения данной технологии в том числе обусловлена истечением в 2009 г. срока действия оригинального патента (рис. 1.15).

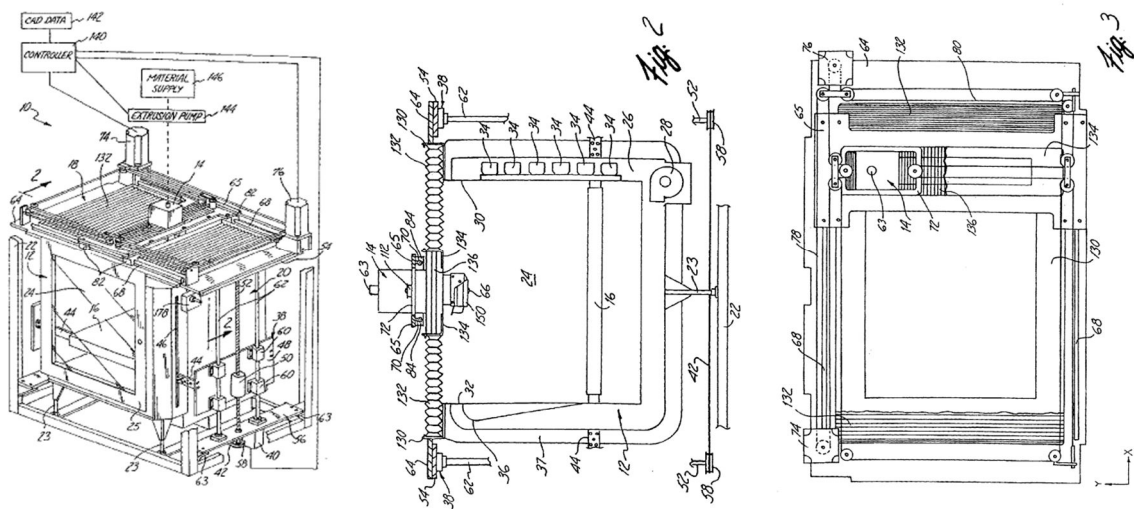


Рис. 1.15. Иллюстрация к патенту: S. Scott Crump.  
Патент США № 6722872, выдан в 1992 г.

Оригинальный термин «Fused Deposition Modeling» и аббревиатура FDM являются торговыми марками компании «Stratasys».

В 1993 г. профессорами Массачусетского технологического института Майклом Симой (Michael Cima) и Эмануэлем Саксом (Emanuel Sachs) было разработано и запатентовано устройство, кото-

рое впервые получило название 3D-принтер. Технология, используемая в данном устройстве, была аналогична технологии печати в обычных струйных принтерах и получила название 3 Dimensional Printing Techniques (3DP) – технология трехмерной печати (рис. 1.16). В отличие от более ранних попыток, эта машина эволюционировала до создания объектов из пластика, керамики и металла.

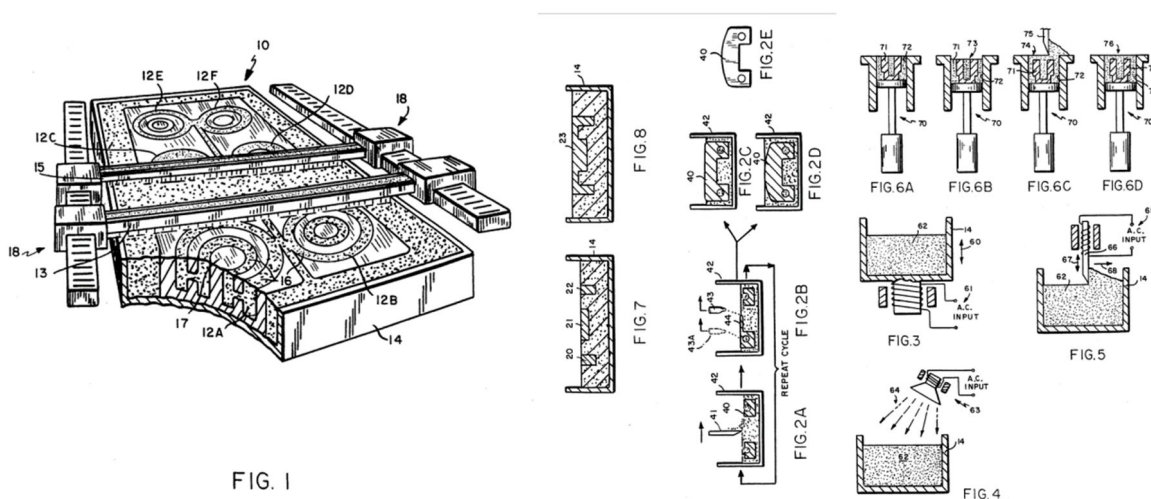


Рис. 1.16. Иллюстрация к патенту: Emanuel Sachs и Michael Cima.  
Патент США № 5340656, выдан в 1993 г.

В 1995 г. началось коммерческое производство данных установок (ZPrinters) компанией Z Corporation, которая получила эксклюзивную лицензию от Массачусетского технологического института на использование технологии 3 DP. Компания Z Corporation была основана Мариной Хацопулос (Marina Hatzopoulos), Уолтером Борнхорстом (Walter Bornhorst), Джеймсом Бредтом (James Bredt) и Тимом Андерсоном (Tim Anderson). В ZPrinters печатающая головка, похожая на струйную, перемещается по слою порошка, выборочно нанося жидкий связующий материал. Оператор должен распределить свежий слой порошка по верхней части модели и повторить процесс. Когда модель завершена, несвязанный порошок автоматически удаляется [5]. Компания была продана Contex Holding в августе 2005 г. и в конечном итоге была приобретена 3D Systems 3 января 2012 г.

В 1998 г. фирма Helisys of Torrance получила патент от Михаила Фейгена (рис. 1.17), изобретателя технологии Laminated Object

Manufacturing (LOM) – производство ламинированных изделий, запатентовавшего свое изобретение в 1985 г., за год до появления патента на другой метод – SLA. В 2000 г. предприятие прекратило свое существование. Преемником этой компании стала Cubic Technologies, которая существует и по сей день.

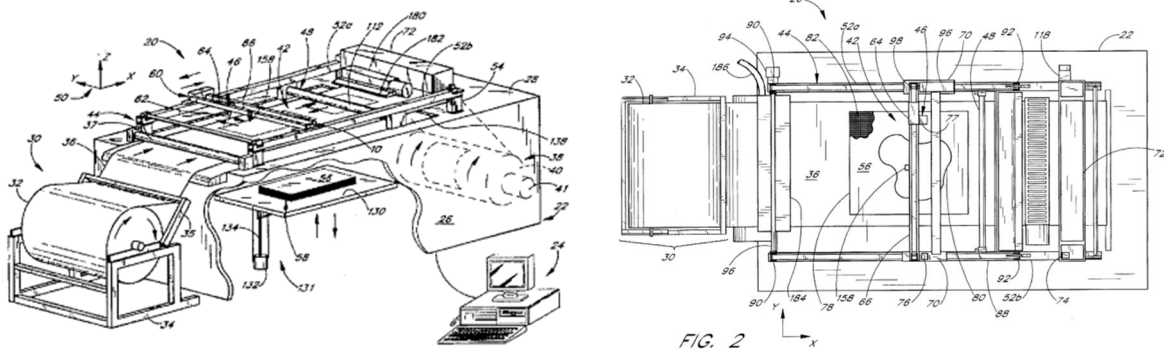


Рис. 1.17. Иллюстрация к патенту: Michael Feugin. Патент США № 5730817, выдан в 1998 г.

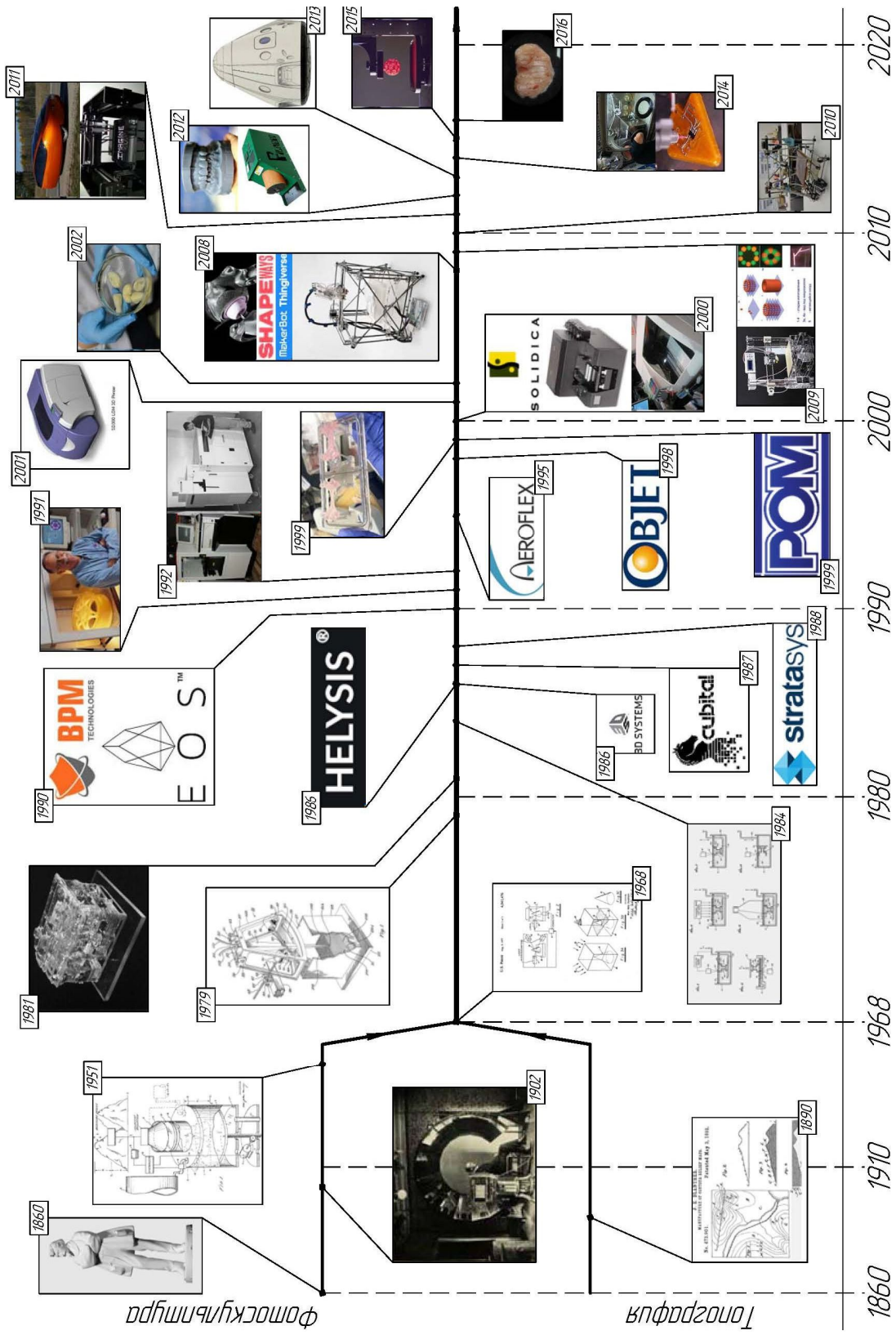
2004 г. был годом начала проекта Replicating Rapid Prototyper (RepRap) – самовоспроизводящийся механизм для быстрого изготовления прототипов. Проект направлен на создание самокопирующегося устройства, которое может быть использовано для быстрого прототипирования и производства. Устройство RepRap представляет собой 3D-принтер, способный создавать объемные изделия на основе моделей, сгенерированных компьютером. Одной из целей проекта является «самокопирование», определяемое авторами как способность аппарата воспроизводить компоненты, необходимые для создания другой версии себя. Аппарат представляет собой разработку с общедоступными наработками.

Благодаря способности аппарата к самовоспроизводству авторы считают возможным дешево распределять аппараты между людьми и сообществами, позволяя им создавать сложные продукты и артефакты без необходимости создания дорогой производственной инфраструктуры. Дальнейшее развитие, по мнению авторов, будет носить эволюционный характер вкуче с возможностью экспоненциально увеличивать число изготовленных устройств. Планируется, что проект станет

одной из «прорывных технологий» наравне с персональным компьютером и интегральными микросхемами.

Другая цель проекта – дать людям независимо от местоположения и с минимальными затратами настольную производственную систему, которая позволит производить многие вещи, используемые в повседневной жизни. Вирусная природа самокопирования также может вызвать экспоненциальный рост и сдвиг парадигмы в дизайне и производстве потребительских товаров: от завода – производителя патентованной продукции к человеку – производителю непатентованных товаров с открытыми спецификациями. При этом акцент транспортировки переместится с доставки готовых товаров потребителю на поставку ему сырья для изготовления нужных предметов. Этот проект с открытым исходным кодом привел к распространению настольных FDM 3D-принтеров и популярности технологии в сообществе производителей. Участники проекта RepRap придумали аналогичный термин «fused filament fabrication» (FFF) – производство способом наплавления нитей – для использования в обход юридических ограничений. Термины FDM и FFF равнозначны по смыслу и назначению.

Рассмотренные исторически значимые этапы развития аддитивных технологий привели к формированию их современного облика: именно они являются наиболее важными и значимыми, так как способствовали появлению основных принципов и технологий построения изделий на основе аддитивных технологий. Однако это не означает, что с 2004 г. в мире аддитивных технологий не происходило заметных событий. Можно отметить перенос штаб-квартиры фирмы 3D Systems в Южную Калифорнию; выход на рынок программного обеспечения для реверс-инжиниринга; создание первого протеза ноги, опубликование патентов на FDM-технологии в открытом доступе; изготовление и имплантация протеза челюсти; выход компании на китайский рынок и создание 3D Systems China; разработка технологии печати костей, а также ввод в эксплуатацию первого жилого дома. Чтобы показать место перечисленных событий в исторической ретроспективе, была составлена схема, на которой все рассмотренные в данной главе события выстроены в хронологическом порядке и представлены в виде понятных пиктограмм (рис. 1.18).



1.18. Исторические этапы развития аддитивных технологий



## Контрольные вопросы

1. Какие две большие группы технологий легли в основу современного аддитивного производства?
2. Кто является автором технологии создания фотоскульптур?
3. Кто является автором технологии создания топографических макетов?
4. Какие материалы использовал в своих работах J. E. Blather?
5. В какой современной технологии аддитивного производства используются принципы, заложенные J. E. Blather?
6. Опишите технологию создания фотоскульптуры, предложенную François Willème.
7. В каком году и кем были начаты эксперименты по разработке технологии послойного синтеза из порошковых материалов?
8. Назовите ученых, работавших в области создания аддитивных технологий на основе эффекта фотополимеризации.
9. Кто является разработчиком первой в мире коммерческой установки аддитивного производства?
10. С какой технологией можно связать появление термина «3D-принтер»?
11. Кто считается автором современной FDM-технологии и в каком году она была разработана?
12. В каком году начался проект Replicating Rapid Prototyper (RepRap) и в чем его суть?

## Глава 2. ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ПРОЦЕССЕ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

### 2.1. Сущность процесса, термины и определения

Аддитивное производство (АП) – общее имя семейства технологичных послойного изготовления физических объектов с использованием электронных моделей компьютерного автоматизированного проектирования. Принцип АП состоит в создании функциональных изделий и поверхностей с помощью послойного добавления материала – наплавления или напыления порошка, добавления жидкого полимера или композита. Идеология АП базируется на цифровом описании изделия, что позволяет широко и гибко использовать концепцию аддитивного производства в целях управления, контроля и интеграции. А это, в свою очередь, дает возможность внедрять инновационные методы управления производством и жизненным циклом изделия вместе с автоматизированными системами управления [6].

В англоязычных источниках наиболее часто фигурируют следующие термины и определения, относящиеся к области аддитивного производства [7]:

1. Additive Fabrication Technology (AF), Additive Manufacturing (AM) или Additive Technology – аддитивная технология (АТ) – термин, объединяющий все способы изготовления изделий аддитивным методом формообразования.

2. Rapid Prototyping and Manufacturing (RP&M) – быстрое прототипирование и изготовление (БПИ) – пожалуй, исторически наиболее ранний термин, подразумевающий использование аддитивных технологий при формировании физических моделей изделий напрямую из их компьютерных геометрических моделей. К настоящему моменту данный термин вытесняется из обращения ввиду неоднозначности трактовки понятия «быстрое», хотя в России понятие БПИ активно используется в публикуемых по данной теме работах [8 – 11]. В ряде случаев термин разделяют на две части. При этом под Rapid Prototyping понимают изготовление прототипов, т. е. физических моделей изделий, не предназначенных для реального функционального применения в каких-либо устройствах. Под Rapid Manufacturing под-



разумевают изготовление функциональных изделий. Термин БПИ определяет сферы применения аддитивных технологий.

3. Solid Freeform Fabrication (SFF) – синтез объемных изделий свободной формы. Данный термин подразумевает любые методы изготовления объемных изделий (не только аддитивные), выполняемые без участия технологической оснастки непосредственно в формообразовании и проходящие без вмешательства человека. SFF является наиболее популярным термином в зарубежной академической среде. В отечественных работах чаще используют укороченную формулировку – «синтез объемных изделий» (СОИ), иногда с уточнением группы метода, например, «лазерный синтез объемных изделий» (ЛСОИ) [11].

4. Layered Manufacturing (LM) – послойный синтез. Означает аддитивные технологии, в которых материал наносится слоями, в отличие от методов, где материал добавляется локализованными объемами – Non-Layered Manufacturing (NLM) [12] – синтез локализованными объемами (СЛО), например, технология Holographic Interference Solidification (QuadTec, США).

5. Desktop Manufacturing (DTM) – настольное производство. Один из ранних терминов в области БПИ, использованный в названии фирмы «DTM, Inc», которая первая коммерчески реализовала технологию селективного лазерного спекания (Selective Laser Sintering). Понятие DTM призвано подчеркнуть непосредственную связь ЭВМ и оборудования БПИ, означает технологии послойного синтеза с использованием компактного (размещаемого на столе) оборудования. В русскоязычных публикациях данный термин не встречается.

6. Solid Imaging – воспроизведение объемных тел. Данный термин используется в документах компании «3D Systems Corp.» (США) [13] и в отношении технологий ряда японских производителей [3, 14]. Чаще всего под Solid Imaging понимают методы SFF, родственные SLA.

7. 3D-printing – трехмерная печать. Под этим термином обычно понимают бюджетные способы быстрого прототипирования и аддитивного производства. Термин часто используется в документах компаний «Stratasys. Inc.» (США) [15], «Z Corp.» (США) [16] и ряда других.

8. Digital Manufacturing, Direct Digital Manufacturing (DDM), Digital Fabrication, Advanced Digital Manufacturing (ADM) – термины-

синонимы, означающие изготовление изделий непосредственно на основе их моделей, созданных в системах автоматизированного проектирования (САПР) [17] без промежуточных этапов – технологическая подготовка производства исключена, производственный процесс состоит из одной технологической операции. Данные термины введены и поддерживаются рядом производителей («Digital Reality, Inc.», «Stratasys, Inc.», «3D Systems Corp.» и др.), а также международным профессиональным сообществом «Society of Manufacturing Engineers» (SME). В некоторых работах понятие Direct Digital Manufacturing однозначно соотносят с быстрым изготовлением [18]. В русскоязычных источниках для обозначения данных терминов-синонимов обычно используют дословные переводы: «цифровое производство», «непосредственное цифровое производство» [19] или развернутые формулировки: «непосредственное изготовление деталей по математической модели» [20], «прямое изготовление деталей по математической модели» [21].

Такое обилие терминов в области аддитивного формообразования обусловлено следующими причинами:

- ✓ фирмы – поставщики технологий и авторы разработок, желая подчеркнуть уникальность своих продуктов, постоянно вводят новые термины, активно используя их в своих информационных ресурсах и материалах;

- ✓ аддитивное формообразование является довольно молодой областью технологии, в связи с чем общие подходы к терминологии еще находятся в стадии формирования;

- ✓ особенности и преимущества аддитивного формообразования настолько многогранны, что авторы, пытаясь популяризировать АТ, подчеркивают ее специфику путем ввода новых терминов.

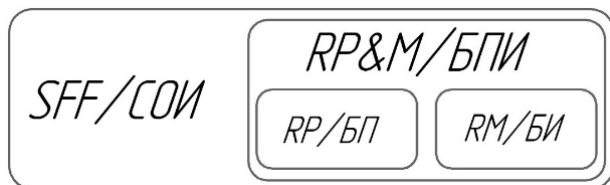


Рис. 2.1. Соотношения между терминами аддитивного формообразования

В данном издании наиболее часто употребляются термины: послойный синтез, аддитивная технология, быстрое прототипирование и изготовление. Их

связь между собой и рядом других терминов отображена на рис. 2.1.

Эффективное развитие и внедрение АТ невозможно без широкомасштабных работ по стандартизации. Американское общество по

испытаниям и материалам (ASTM International Committee F42) вместе с Техническим комитетом (ISO/TC 261) подготовили перечень общепромышленных стандартов, имеющих отношение к аддитивному производству.

В перечень вошли стандарты технических комитетов: ASTM F42, ISO/TC 261, SASAM, BSI. CEN/STAIR-AM, UNM 920 [22].

ASTM в стандарте ASTM F2792.1549323-1 «Аддитивное производство. Термины и определения» так определяет АТ: «Процесс объединения материала с целью создания объекта из данных 3D-модели, как правило, слой за слоем в отличие от “вычитающих” производственных технологий». Таким образом, аддитивные технологии – это только те технологии, которые создают объект по данным 3D-модели, т. е. на основе трехмерной компьютерной модели, а значит, являются принципиально новым методом формообразования. Под «вычитающими» (subtractive) технологиями подразумевается механообработка – удаление («вычитание») материала из массива заготовки (additive – добавление) (рис. 2.2).

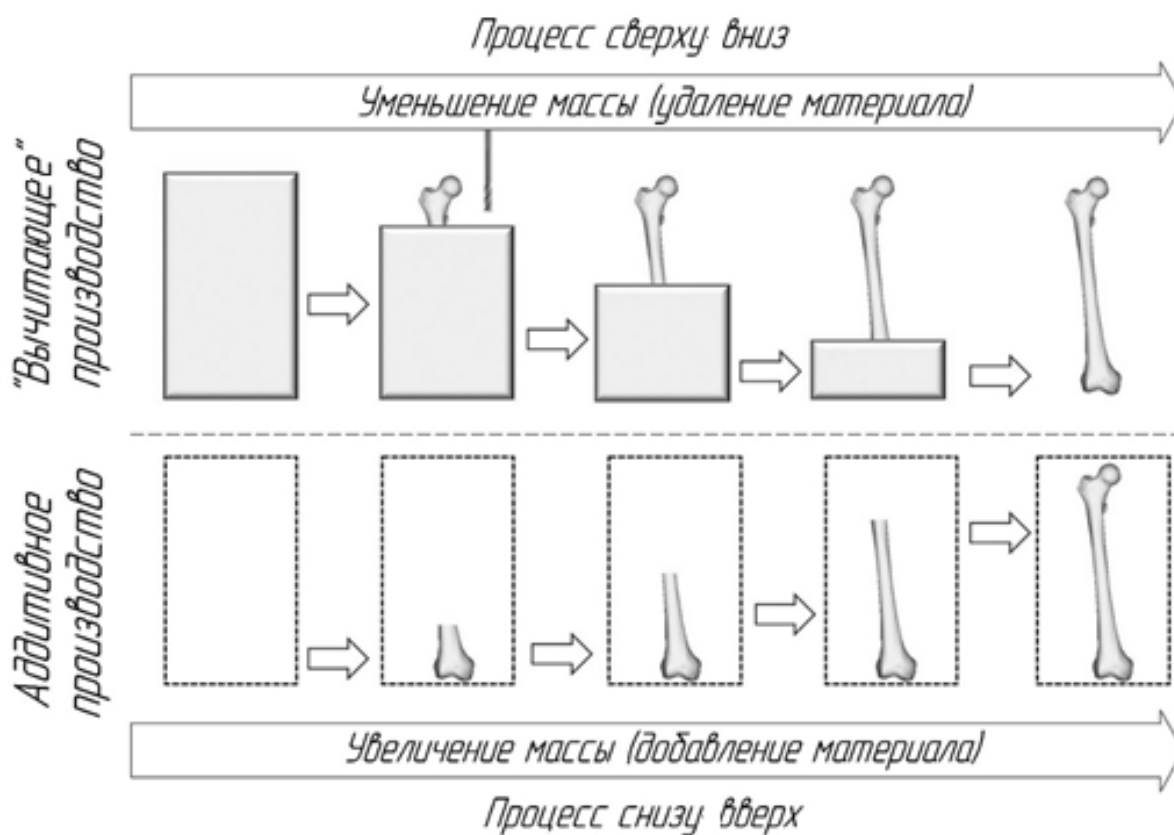


Рис. 2.2. Схемы аддитивного и «вычитающего» производств

Разработка стандартов в области аддитивных технологий ведется быстрыми темпами. Структура стандартов ISO/ASTM в области аддитивного производства представлена на рис. 2.3.

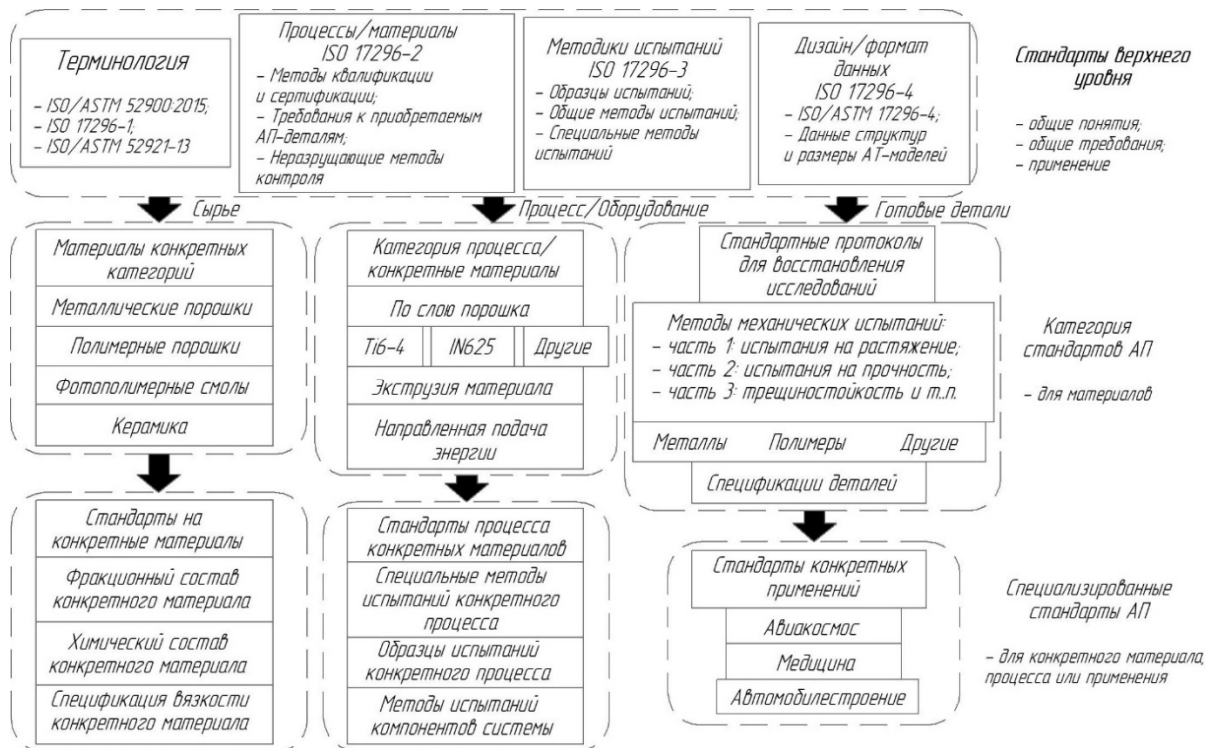


Рис. 2.3. Структура стандарта ISO/ASTM в области аддитивных технологий

Необходимым условием внедрения аддитивных технологий в промышленность России является наличие национальных стандартов, и в этом направлении в настоящее время в нашей стране ведется активная работа. На базе ФГУП «ВИАМ» создан Технический комитет по стандартизации ТК182 «Аддитивные технологии». На момент написания данного материала указанным комитетом разработаны следующие нормативные документы (и работа по стандартизации продолжается):

- ГОСТ Р 57556-2017. Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний;
- ГОСТ Р 57558-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения;
- ГОСТ Р 57586-2017. Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования;
- ГОСТ Р 57587-2017. Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний;

- ГОСТ Р 57588-2017. Оборудование для аддитивных технологических процессов. Общие требования;
- ГОСТ Р 57589-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования;
- ГОСТ Р 57590-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 3. Общие требования;
- ГОСТ Р 57591-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 4. Обработка данных;
- ГОСТ Р 57910-2017. Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний металлических материалов сырья и продукции;
- ГОСТ Р 57911-2017. Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Термины и определения;
- ГОСТ Р 58418-2019. Аддитивные технологии. Металлические порошки и проволоки. Виды дефектов. Классификация, термины и определения;
- ГОСТ Р 58419-2019. Аддитивные технологии. Изделия из титановых сплавов, изготовленные методом селективного электронно-лучевого сплавления. Общие технические условия;
- ГОСТ Р 58597-2019. Аддитивные технологии. Меры неразрушающего контроля, изготовленные методами аддитивных технологий;
- ГОСТ Р 58598-2019. Аддитивные технологии. Виды и методы неразрушающего контроля изделий;
- ГОСТ Р 58600-2019. Аддитивные технологии. Неразрушающий контроль металлических изделий, изготовленных методами аддитивных технологий. Основные положения;
- ГОСТ Р 59183-2020. Аддитивные технологии. Изделия, полученные методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции стали марки 08X18N10T;
- ГОСТ Р 59184-2020. Аддитивные технологии. Оборудование для селективного лазерного сплавления. Общие требования;
- ГОСТ Р 59185-2020. Аддитивные технологии. Изделия, полученные методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции титанового сплава марки ВТ6. Общие технические требования;

- ГОСТ Р 59035-2020. Аддитивные технологии. Металлопорошковые композиции. Общие требования;
- ГОСТ Р 59036-2020. Аддитивные технологии. Производство на основе селективного лазерного сплавления металлических порошков. Общие положения;
- ГОСТ Р 59037-2020. Аддитивные технологии. Конструирование металлических изделий. Руководящие принципы;
- ГОСТ Р 59038-2020. Аддитивные технологии. Подтверждение качества и свойств металлических изделий;
- ГОСТ Р 59130-2020. Аддитивные технологии. Подтверждение качества и свойств изделий для судостроения и морской техники;
- ГОСТ Р 59131-2020. Аддитивные технологии. Изделия фигурные из алюминиевых сплавов. Общие технические условия;
- ГОСТ Р 59094-2020. Требования к оформлению документов на технологические процессы изготовления изделий методом порошковой металлургии;
- ГОСТ Р 59095-2020. Материалы для аддитивного строительного производства. Термины и определения;
- ГОСТ Р 59096-2020. Материалы для аддитивного строительного производства. Методы испытаний;
- ГОСТ Р 59097-2020. Материалы для аддитивного строительного производства. Технические требования;
- ПНСТ 473-2020. Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Требования к образцам для испытаний;
- ГОСТ Р 59650-2021. Литые под давлением полимерных материалов, высоконаполненных металлическими или керамическими порошками (PIM-технология). Термины и определения;
- ГОСТ Р 59651-2021. Изделия из сталей и сплавов, изготовленные методом литья под давлением полимерных материалов, высоконаполненных металлическими порошками (MIM-технология). Общие технические условия.

Анализируя представленные отечественные стандарты, нельзя не заметить, что их структура полностью соответствует структуре стандарта ASTM. При первом знакомстве с миром аддитивных технологий авторы рекомендуют обратиться именно к этим источникам литературы для изучения основных терминов, определений, используемых материалов и т. д.

## 2.2. Классификация аддитивных технологий

На сегодняшний день насчитывается более сотни различных методов формообразования, объединенных общим принципом аддитивности и отличающихся реализацией. Как правило, классификацию методов аддитивного формообразования производят по указанным ниже признакам.

*По ограничениям к сложности изготавливаемых изделий:*

- ✓ с неограниченной сложностью формируемых изделий (синтез объемных изделий свободной формы – SFF);
- ✓ с ограниченной сложностью формируемых изделий.

*По принципу добавления материала:*

- ✓ послойный синтез (LM);
- ✓ синтез локализованными объемами (NLM).

*По принципу построения изделия выделяют методы [18]:*

- ✓ фотополимеризации (Photopolymerization Processes);
- ✓ слияния порошковых оснований (Powder Bed Fusion Processes);
- ✓ послойной экструзии (Extrusion-based Systems);
- ✓ печати (Printing Processes);
- ✓ листового ламинирования (Sheet Laminating Processes);
- ✓ послойной наплавки (Beam Deposition Processes).

*По состоянию исходного (строительного) материала [23].*

На рис. 2.4 представлена упрощенная адаптированная версия данной классификации АТ, предложенная С. К. Chua и его соавторами. В основу данной классификации положено агрегатное состояние материала, используемого в конкретной технологии АП, т. е. ключевым является «материал» и его структурно-фазовое состояние:

- а) с жидким строительным материалом (Liquid-based System):
  - ✓ лазерная стереолитография (SLA);
  - ✓ Cubital's Solid Groud System (SGC);
  - ✓ D-MEC's Solid Creation System (SCS);
  - ✓ CMET's Solid Object Ultraviolet Laser Printer (SOUP);
  - ✓ Teijin Seiki's Soliform System;
  - ✓ Meiko's Rapid Prototyping System;
  - ✓ БП методом заморозки, или Freeze Water Method (FWM);
  - ✓ протекционно-масочная стереолитография – MicroTEC;
  - ✓ двухфотонная стереолитография;



б) с порошковым строительным материалом (Powder-based System):

- ✓ **селективное лазерное спекание/плавление** (СЛС/П);
- ✓ процесс лазерного инжиниринга точных форм – Optomec’s Laser Engineering Net Shaping (LENS);
- ✓ электронно-лучевое плавление – Acram’s Electron Beam Melting (EBM);
- ✓ Laser cusing (Concept Laser GmbH);
- ✓ направленное нанесение металла – POM’s Direct Metal Deposition (DMD);
- ✓ объемная лазерная наплавка – 3D Laser Cladding (Liverpool University);
- ✓ объемная лазерная сварка – 3D Laser Welding (Southern Methodist University);
- ✓ объемная лазерная генерация – 3D Laser generating (Fraunhofer-Institute of Production Technology (IPT));
- ✓ Soligen’s Direct Shell Production Casting (DSPC);
- ✓ Fraunhofer’s Multiphase Jet Solidification (MJS);
- ✓ Aeromet Corporation’s Lasform Technology;
- ✓ Generis Rp Systems (GS);
- ✓ Therics Inc.’s Theriform Technology;
- ✓ **трехмерная печать** (Z Corporation);

в) с твердым строительным материалом (Solid-based System):

- ✓ **методика построения изделий из листового материала** – LOM (Cubic);
- ✓ ультразвуковая консолидация (УЗК) ламината;
- ✓ Kira Paper lamination Technology (PLT);
- ✓ моделирование методом послойного наплавления (FDM, Stratosys);
- ✓ 3D System Multi-Jet Modeling (MJM) System;
- ✓ Solidscape’s Model Maker and Pattern Master (Sanders Prototype, Inc.);
- ✓ Beijing Yinhua’s Slicing Solid Manufacturing (SSM);
- ✓ Melted Extrusion Modeling (MEM);
- ✓ Multi-Functional RPM Systems (M-PRM);
- ✓ послойное создание литевой формы (Shape Deposition Manufacturing (SDM)).

Жирным шрифтом в каждом классе выделены методики, считающиеся основными, – их не более одной-двух. Между тем, например, методика послойного создания литевой формы (SDM) с полным основанием может быть отнесена к субтрактивному процессу БПИ, но при этом остается твердофазным подходом БПИ.

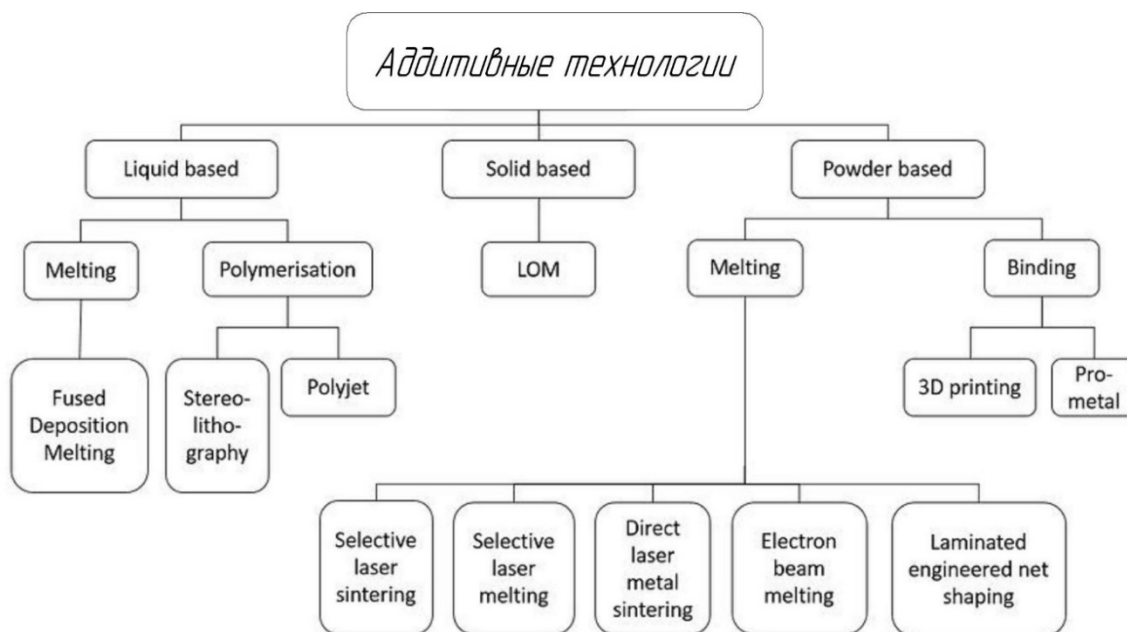


Рис. 2.4. Классификация аддитивных технологий

*По виду материала изделия [23; 24]:*

- ✓ методы изготовления полимерных изделий;
- ✓ методы изготовления металлических изделий;
- ✓ методы изготовления керамических изделий.

*По виду энергетического воздействия:*

- ✓ с тепловым воздействием (лазерное излучение, инфракрасное излучение);
  - ✓ оптическим воздействием (лазерное излучение, излучение УФ-ламп и т. п.);
  - ✓ механическим воздействием (режущим инструментом, ультразвуком и др.);
  - ✓ электромагнитным воздействием (электронные пучки);
  - ✓ химическим воздействием.
- По схеме формирования слоя:*
- ✓ с построчной схемой формирования;
  - ✓ послойной схемой формирования.

*По состоянию изделия после формирования (по значению последующей постобработки изделий):*

- ✓ прямые методы формирования;
- ✓ косвенные методы формирования.

Развернутую иерархию методов аддитивной технологии с примерами классификации представил Э. Нотис [E. Negis, Турция) [9]. Сокращенная интерпретация данной классификации представлена на рис. 2.5.

Также интерес представляет древовидная диаграмма, полученная 3D Print Media Network в сотрудничестве с 3D Printing Business Directory, которые недавно создали и опубликовали первую интерактивную карту коммерчески доступных технологий 3D-печати (The 3dpbm interactive map of commercially available AM technologies (3dprintingmedia.network)).

Карта, созданная для функционирования в качестве инструмента исследований и развития бизнеса, показывает всех основных игроков на ландшафте аддитивного производства (рис. 2.6).

Древовидная диаграмма включает в себя 132 поставщика в 38 различных процессах 3D-печати в пяти различных типах материалов. Нажав на пиктограмму с названием каждой компании и технологии (в самых внешних полях с белым фоном), вы получите доступ к странице бизнес-справочника 3D-печати для этой компании, где будут указаны все их соответствующие контактные данные, по которым вы можете с ними связаться.

Очевидно, что не все производители оборудования для АП могут быть представлены на карте (3DBD в настоящее время перечисляет более 800 компаний).

Критерии, которым следовали разработчики карты при отборе, представлены ниже.

1. Историческая значимость компании.
2. Разрушительность компании и ее технологий.
3. Финансовая мощь компании.
4. Взаимодействие компании с 3dpbm.
5. Коммерческий успех компании.



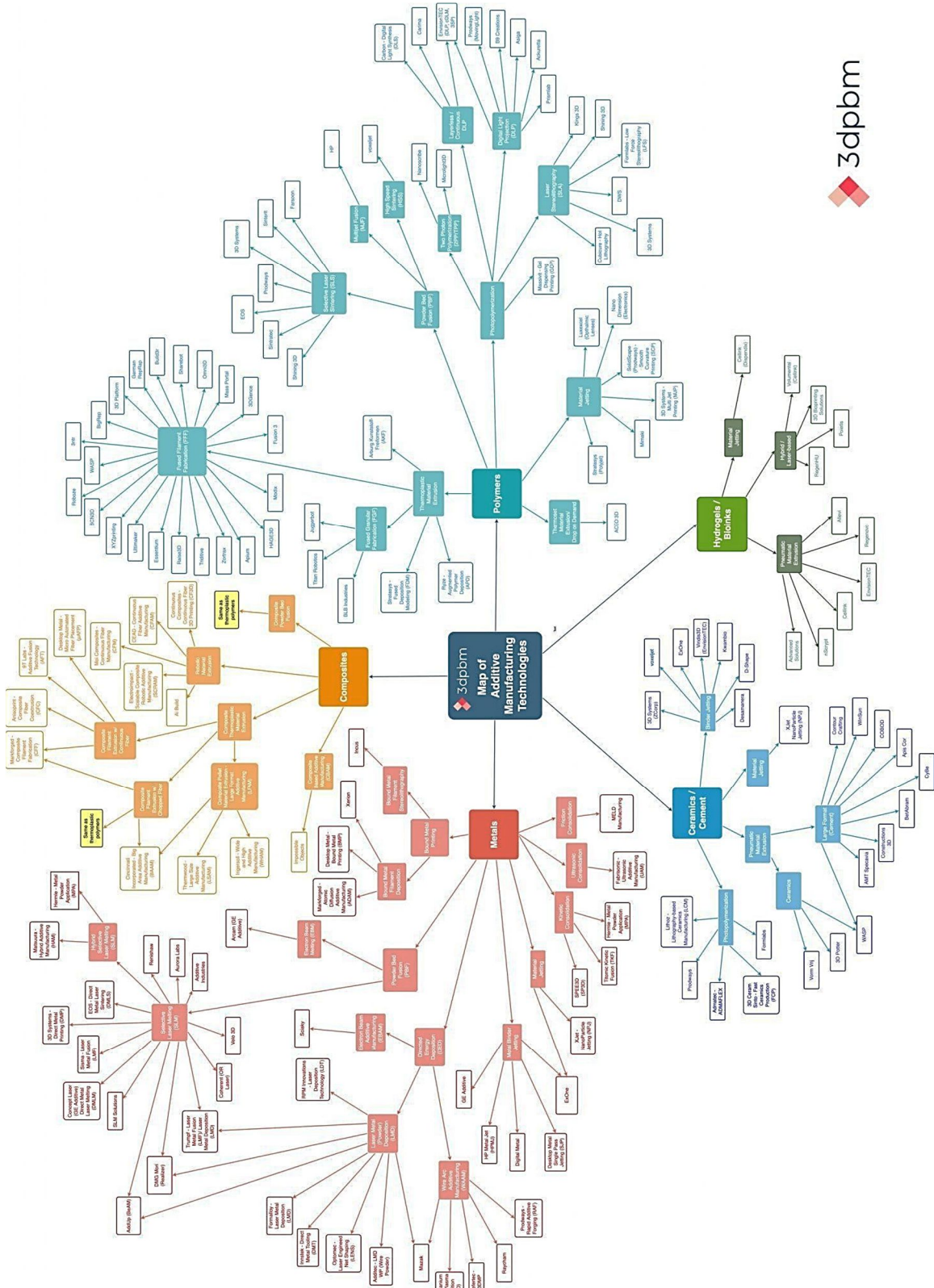


Рис. 2.6. Карта коммерчески доступных технологий 3D-печати

Анализируя приведенные выше классификации, можно заметить, что они имеют как различные, так и общие классификационные признаки, построены по иерархическому или независимому принципу, однако в основу всех классификаций тем или иным образом можно положить семь основных принципов/категорий (классификация ASTM) построения изделий на основе аддитивных технологий; также необходимо отразить такие классификационные признаки, как вид ключевой технологии, метод фиксации слоя и тип строительного материала. Именно такая классификация представлена на рис. 2.7, она дополнена перечнем коммерчески успешных производителей оборудования для каждой технологии.

В основе данной классификации, как было отмечено выше, лежат семь принципиально разных категорий построения изделий с использованием аддитивных технологий. Рассмотрим данные категории более подробно, приведя графические схемы построения изделий с описанием технологического процесса для каждой категории и наиболее часто используемых видов строительного материала. Цель этой главы не в том, чтобы описать все существующие технологии, а, скорее, дать общее представление о том, как работает каждая категория технологий аддитивного производства [25]. Описание конкретных технологий аддитивного производства со схемами их реализации, отличительными чертами в рамках одной категории (количество экструдеров, УФ-лампа или лазер и др.) будет приведено в отдельной главе данного пособия.

# Аддитивные технологии

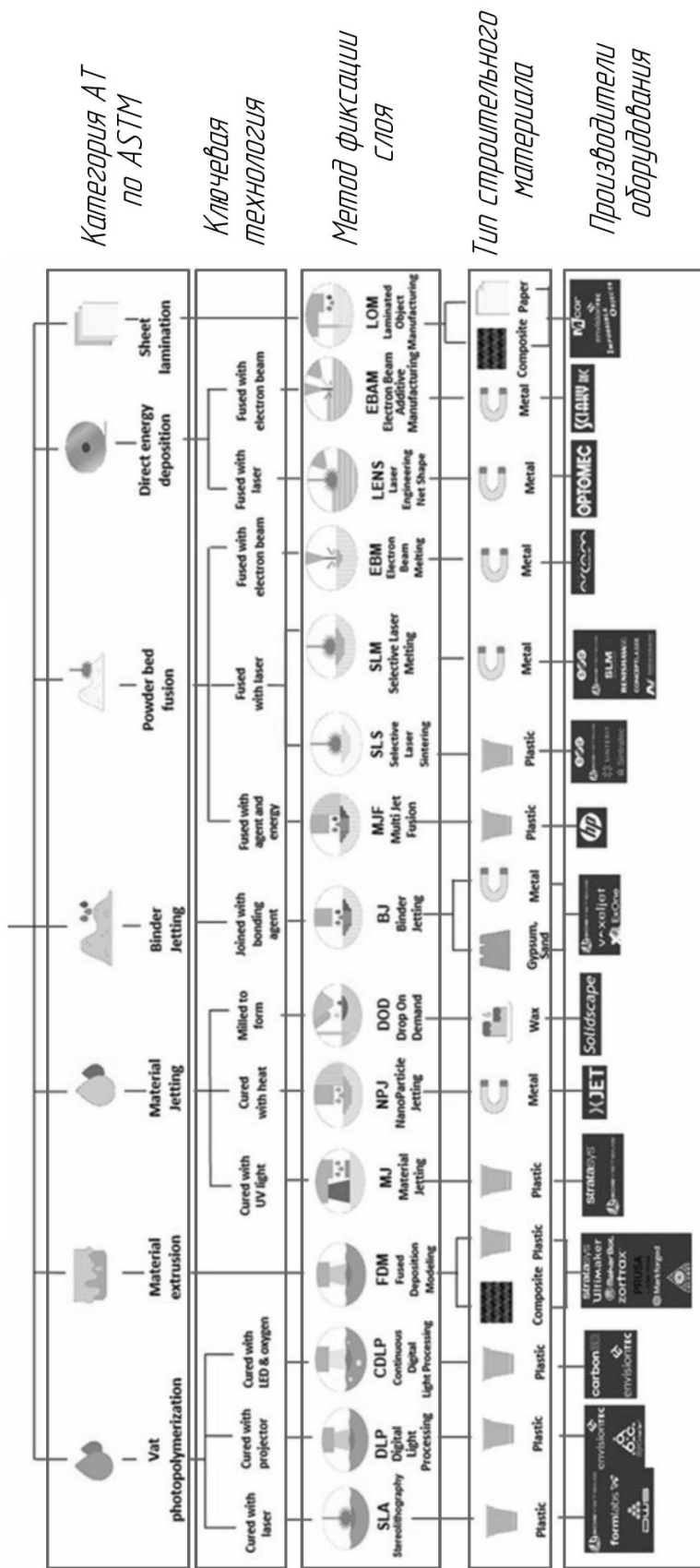


Рис. 2.7. Классификация методов аддитивного формообразования с примерами технологий

на основе классификации ASTM



## 2.3. Категории построения изделий на основе аддитивных технологий

### 2.3.1. Экструзия материала

Наиболее распространенной технологией аддитивного производства на основе экструзии материалов является Fused Deposition Modeling (FDM) – моделирование методом послойного наплавления. Эта технология подразумевает создание трехмерных объектов за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели. Как правило, в качестве материалов для изготовления выступают термопластики, поставляемые в виде катушек нитей или прутков. После нанесения текущего слоя материала платформа построения перемещается вниз на долю миллиметра и наносится следующий слой поверх предыдущего. Поскольку пластик находится в расплавленном состоянии, он приклеивается к предыдущему слою.

Самый простой способ понять процесс – представить его как термопистолет с компьютерным управлением, который используется для рисования каждого фрагмента модели. Системы экструзии материала часто имеют второе сопло, которое наносит другой вспомогательный материал – «поддержку» для каждого слоя модели, если это необходимо. Вспомогательный материал предназначен для создания нависающих поверхностей, на которые в дальнейшем будет необходимо наносить материал. Этот вспомогательный материал поддерживает материал последующего слоя, поэтому он и получил название «поддержка». После того как модель готова, вспомогательный материал удаляют путем его отрыва от модели или растворения (рис. 2.8).

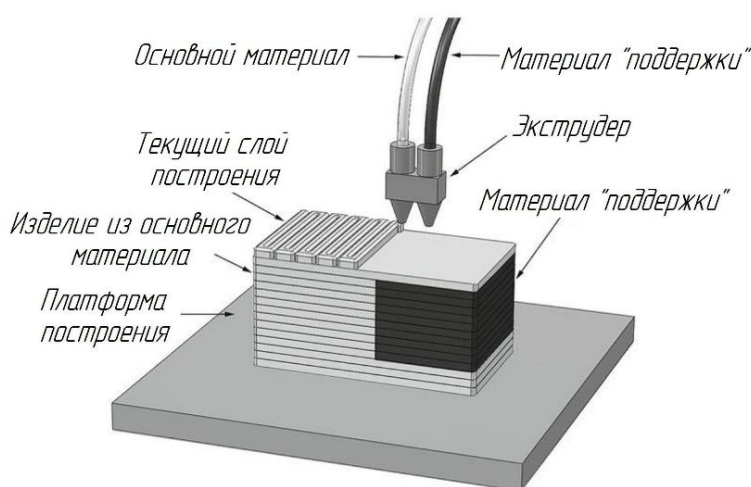


Рис. 2.8. Схема процесса на основе метода послойного наплавления



На рынке имеется ряд систем экструзии материалов, способных печатать композиционными материалами, в том числе углеродным волокном в виде непрерывной нити или рублеными композитными прядями (углеродное волокно, кевлар, стекловолокно и др.). Системы используют полимерную нить, в которой полимер смешивается с рублеными нитями композитного наполнителя, или коэкструдированный полимер с непрерывной нитью.

В настоящее время становятся доступными системы экструзии металлических материалов, в которых нить или стержень (пруток), состоящие из полимера, наполненного металлическим порошком (содержание металлического порошка часто около 80 %), экструдирется для формирования композитных металлических/полимерных деталей, которые затем могут спекаться в печи, чтобы выжечь полимер и сплавить металлический порошок для получения металлических изделий. Изделия при спекании могут давать усадку до 20 %, поэтому особое внимание должно быть уделено конструкции детали, чтобы сделать эту усадку равномерной.

Одна из проблем с системами экструзии материалов заключается в том, что детали, которые они производят, имеют тенденцию к анизотропии (в большей степени, чем другие процессы БПИ) таким образом, что части слабее в вертикальном направлении  $Z$ , чем в горизонтальном ( $X$  и  $Y$ ) по той причине, что связь между слоями материала немного слабее, чем пластик, что формирует эти слои. Его можно рассматривать как древесное волокно, где древесина прочная, когда сила приложена перпендикулярно волокну, но слабая, когда сила приложена параллельно волокнам древесины. Так что в целом для деталей, которые будут испытывать в основном сжимающие напряжения, экструзия материала считается более подходящим быстрым производственным процессом, чем для деталей, которые могут находиться под воздействием растягивающих напряжений, что может привести к их расслаиванию.

Следует также отметить, что технология экструзии материалов постоянно совершенствуется и эта проблема постепенно уменьшается по мере появления на рынке новых машин.

Отделка поверхностей изделий, полученных технологией экструзии материалов, также может быть проблемой в зависимости от предполагаемого применения, так как она, как правило, имеет самое

низкое качество поверхности из всех технологий, описанных в этой главе. В частности, пологие наклонные поверхности могут иметь вполне заметную «ступеньку». Обратите внимание, что это явление относится ко всем технологиям БПИ, но особенно заметно в технологиях экструзии материалов.

Наиболее распространенными областями применения категории технологий экструзии материалов являются:

**при прототипировании:**

✓ большинство областей применения, но детали требуют существенной постобработки для придания соответствующего вида прототипу;

**при производстве:**

- ✓ зажимные и кондукторные приспособления;
- ✓ большинство областей применения, при которых деталь не находится под напряжением в направлении анизотропии;
- ✓ использование определенных полимеров, недоступных для других технологий.

Категории технологий экструзии материалов имеют свои преимущества и недостатки.

**Преимущества:**

- ✓ самые доступные машины для БПИ;
- ✓ печать с использованием стандартного термопластика;
- ✓ недорогие конструкционные материалы;
- ✓ простые в использовании машины БПИ.

**Недостатки:**

- ✓ наиболее выражены анизотропные свойства в направлении  $Z$ ;
- ✓ минимальное качество поверхности;
- ✓ требуется дополнительный материал для «поддержек»;
- ✓ сложный по химическому составу материал «поддержек».

### ***2.3.2. Струйное распыление основного материала***

В данных технологиях используется печатающая головка, похожая на головку струйного принтера, для нанесения жидкого фотополимерного материала по каплям на каждый слой модели, имеется также источник УФ-излучения, прикрепленный к печатающей головке, который отверждает нанесенные капли материала при прохождении над ними. Печатающая головка предназначена для нанесения как

основного (конструкционного) материала, так и материала «поддержек» в случае необходимости для каждого слоя изделия.

Машины БПИ на основе технологии струйной печати используются для изготовления изделий с высоким разрешением из множества различных материалов: пластмассоподобных и эластомерных материалов, а также воска, который обычно используется для изготовления изделий, которые в дальнейшем применяются для литья по выплавляемым моделям, и ювелирных изделий. Новое поколение машин может также использовать несколько материалов при изготовлении одной и той же детали, что делает их полезными для производства полноцветных изделий, а также композитных, таких как, например, пластмассовые детали, покрытые резиной.

УФ-свет, который следует за печатающей головкой, полностью отверждает материалы, поэтому для данного процесса в отличие от фотополимеризации в ванне постотверждения не требуется (рис. 2.9). Материал «поддержки» удаляется механически, например, с помощью гидроабразивной резки.

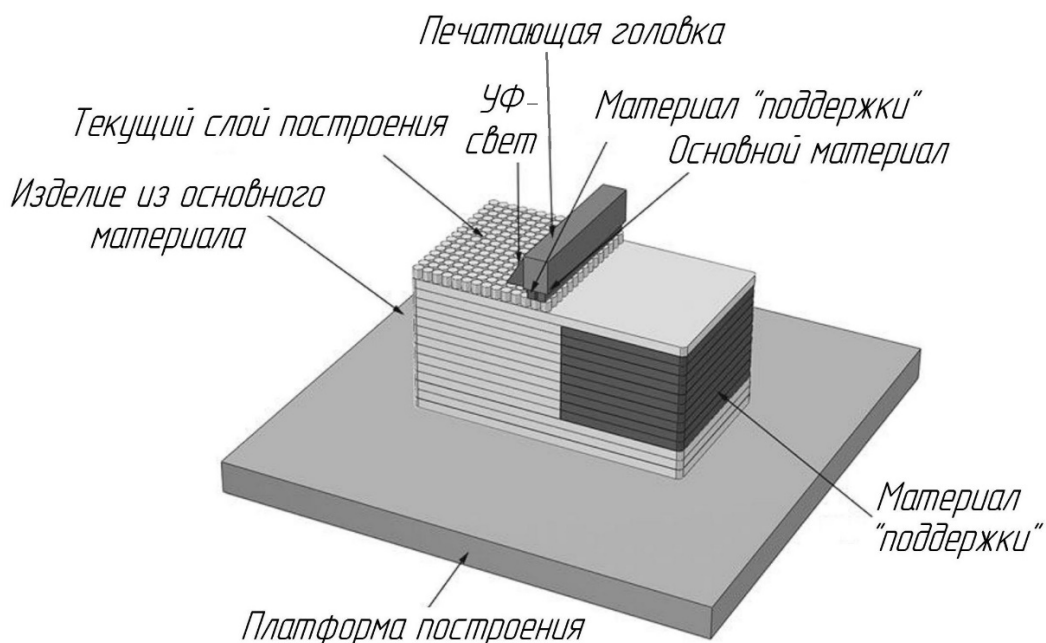


Рис. 2.9. Схема процесса на основе распыления основного материала

Два основных фактора, которые следует учитывать при использовании технологий на основе распыления основного материала, – это этапы постобработки, необходимые для удаления вспомогательного материала, и тот факт, что технологии струйной обработки материала

лов, как правило, подвержены влиянию УФ-излучения, в том числе УФ-излучения нормального окружающего солнечного света, что ограничивает их эксплуатацию, например, под прямыми солнечными лучами. Если оставить материал без защиты и под воздействием окружающего УФ-излучения, его свойства и цвет детали изменяются в течение незначительного периода времени.

В настоящее время на рынке появляются системы БПИ на основе распыления основного материала для металлических материалов, в которых связующее наполнено металлическими или керамическими наночастицами. По мере изготовления детали тепло используется для испарения связующего и сплавления металлических или керамических частиц; данные системы в основном используются для изготовления небольших деталей из-за их усадки, возникающей в процессе изготовления.

Наиболее распространенными областями применения категории технологий на основе распыления основного материала являются:

**при прототипировании:**

- ✓ большинство областей применения, в частности, для высококачественных прототипов из-за высокого уровня детализации и качества поверхности;

- ✓ появление технологий полноцветной и многокомпонентной струйной печати сделали ее излюбленной технологией для изготовления высококачественных прототипов;

**при производстве:**

- ✓ области, в которых продукт не будет подвергаться воздействию УФ-излучения окружающей среды в течение длительного времени;

- ✓ образцы литья по выплавляемым моделям;

- ✓ для мелких партий литейной оснастки и пресс-форм для литья под давлением.

Категории технологий на основе распыления основного материала имеют свои преимущества и недостатки.

**Преимущества:**

- ✓ лучшее качество поверхности среди всех технологий БПИ (вместе с фотополимеризацией в ванне);

- ✓ позволяет изготавливать прозрачные изделия;

- ✓ дает возможность изготавливать многокомпонентные и полноцветные детали;

✓ позволяет изготавливать детали из воска для литья по выплавляемым моделям.

### **Недостатки:**

✓ свойства материала меняются под действием УФ-излучения с течением времени;

✓ эластомерные материалы выдерживают малые растягивающие напряжения;

✓ смола является токсичной и может быть опасна при снятии изделий с машины и при постобработке;

✓ требуется материал «поддержки» для нависающих элементов изделия.

### **2.3.3. Струйное распыление связующего материала**

Струйное распыление связующего материала, которое также было первой технологией, где появился термин 3D-печать, представляет собой технологию аддитивного производства на основе порошка. Технология заключается в том, что слой порошка наносится на платформу построения и происходит распыление связующего материала на требуемые участки слоя с помощью печатающей головки.

Везде, где на порошок наносится связующий материал, порошок затвердевает. Платформа построения затем опускается, поверх первого слоя наносится следующий слой порошка, и процесс повторяется до тех пор, пока изделие не будет изготовлено (рис. 2.10).

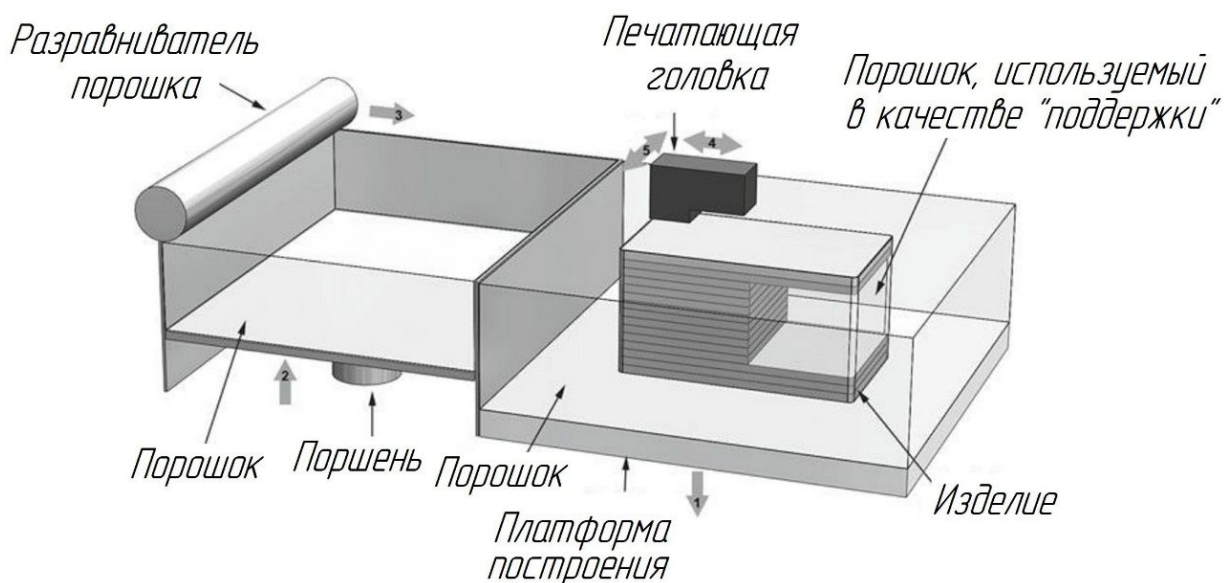


Рис. 2.10. Схема процесса на основе распыления связующего материала

После окончания процесса изготовления платформа построения поднимается и порошок, не подвергшийся воздействию связующего вещества, убирают щеткой или пылесосом для извлечения детали. Одним из преимуществ этой технологии следует назвать то, что некоторые из доступных материалов, такие как гипсовые и металлические порошки, полиметилметакрилат (органическое стекло) и ряд керамических порошков (песков), делают его полезным для производства, например, песчаных форм для литья, которые можно использовать для литья металлических деталей традиционным способом.

С точки зрения промышленного использования это одна из самых простых технологий, потому что литье в песчаные формы имеет долгую историю использования, поэтому инженеры полностью доверяют деталям, отлитым в песок. Но это только пресс-формы для изделий, произведенных на основе БПИ.

Наиболее распространенными областями применения категории технологий на основе распыления связующего материала являются:

**при прототипировании:**

✓ при использовании гипсового порошка в областях, не предъявляющих больших требований к прочности и где требуется полноцветная печать;

**при производстве:**

- ✓ для изготовления песчаных форм для литья;
- ✓ для изготовления пресс-форм из оргстекла для литья по выплавляемым моделям;
- ✓ для производства металлических изделий.

Категории технологий на основе распыления связующего материала имеют свои преимущества и недостатки.

**Преимущества:**

- ✓ при печати гипсом или порошком оргстекла процесс может производить полноцветные детали;
- ✓ дает возможность изготавливать металлические изделия (но требуется спекание как вторичная операция);
- ✓ позволяет создавать песчаные формы и стержни для изготовления металлических отливок;
- ✓ позволяет производить модели для литья по выплавляемым моделям из оргстекла.

### Недостатки:

✓ при печати гипсом деталь получается очень хрупкой и требует обработки укрепляющей смолой;

✓ объем порошка, требующий спекания, после печати может уменьшиться на 20 %.

### 2.3.4. Листовое ламинирование

Процессы листового ламинирования включают производство ламинированных объектов – Laminated Object Manufacturing (LOM) и производство методом ультразвуковой склейки пленки – Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM). При производстве ламинированных объектов используется бумага или полимерная пленка, из которой вырезается соответствующая форма для каждого слоя модели; используют лезвие и клей, чтобы соединить вместе слой за слоем. Ламинированные объекты часто применяются для эстетических и визуальных моделей, но, как правило, не подходят для функционального использования (рис. 2.11).

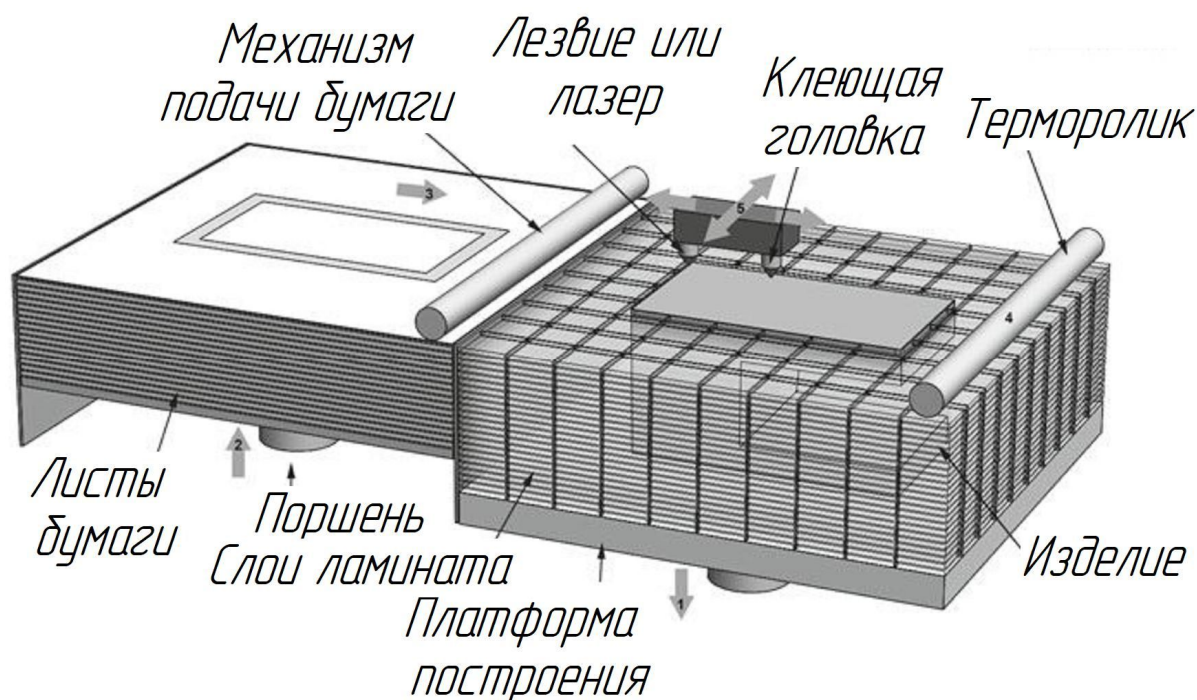


Рис. 2.11. Схема процесса на основе листового ламинирования

При LOM-технологии, поскольку используется бумага, процесс не требует каких-либо специальных инструментов и эффективен по

времени. Так как функционал деталей ограничен, добавление клея, краски, шлифовка, а также дальнейшая механическая обработка могут улучшить внешний вид полученного изделия.

В процессе ультразвукового аддитивного производства (UAM) используются листы металла, которые соединяются друг с другом с помощью ультразвуковой сварки. Процесс требует дополнительной обработки по удалению лишнего объема материала на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), так как в отличие от LOM, металл не может быть легко удален вручную, поэтому лишний объем материала удаляется механической обработкой (например, фрезерованием). Механическую обработку можно выполнять после добавления каждого слоя или после окончания всего процесса.

Используемые металлы включают алюминий, медь, нержавеющей сталь и титан. Процесс происходит при низкой температуре и позволяет создавать внутреннюю геометрию изделия. Одним из ключевых преимуществ следует назвать то, что этот процесс может связывать различные материалы и требует относительно невысоких затрат энергии, так как не требуется плавить металл, а вместо этого используется комбинация ультразвуковых частот и давления для соединения слоев материала, которое происходит за счет пластической деформации металлов.

Постобработка требует извлечения детали из окружающего его листового материала. Чаще всего это делается с избыточным материалом каждого слоя, окружающим деталь после того, как последующий слой прикрепляется к предыдущему.

Наиболее распространенными областями применения категории технологий на основе ламинирования листового материала являются:

**при прототипировании:**

✓ большинство областей применения, где имеет значение стоимость материала и цвет;

**при производстве:**

✓ LOM используется для изготовления моделей для литья в песчаные формы;

✓ UAM можно использовать для изготовления функциональных изделий из металла.

Категории технологий на основе ламинирования листового материала имеют свои преимущества и недостатки.



### **Преимущества:**

- ✓ скорость печати, низкая стоимость, простота использования материала, но прочность моделей зависит от используемого клея;
- ✓ высокая скорость обработки за счет обрезки только по площади поперечного сечения слоя;
- ✓ позволяет создавать песчаные формы и стержни для изготовления металлических отливок;
- ✓ позволяет производить модели для литья по выплавляемым моделям из оргстекла.

### **Недостатки:**

- ✓ внешний вид может варьироваться в зависимости от качества и типа бумаги или пластикового материала, а также существует необходимость последующей постобработки для достижения желаемого эффекта;
- ✓ процессы создания изделий требуют дополнительных исследований для массового применения;
- ✓ ограниченное использование материала.

### **2.3.5. Фотополимеризация в ванне**

Технологии фотополимеризации в ванне позволяют производить изделия из жидких смол, которые отверждаются (затвердевают) под действием УФ-излучения.

При фотополимеризации в ванне используется луч УФ-лазерного света, лампы или проектора, чтобы отвердить слои смолы для каждого сечения модели. Луч УФ-излучения сканирует поверхность жидкой фотополимерной смолы для каждого среза модели и везде, где луч попадает на поверхность смолы, она затвердевает. Платформа построения затем опускается в смолу на долю миллиметра, образуя новый слой смолы, который распределяется поверх предыдущего слоя, и процесс воздействия УФ-излучения повторяется и связывает нанесенный слой смолы с предыдущим. Процесс повторяется, изготавливаемое изделие постепенно погружается в смолу, в то время как новые слои добавляются сверху, пока не будет построено все изделие. Обратите внимание, что у некоторых систем платформа построения движется снизу вверх, а не сверху вниз. В них источник УФ-излучения помещается под резервуаром (ванной) с фотополимерной смолой, а УФ-излучение воздействует на материал через прозрачное

окно; изготавливаемое изделие извлекается платформой построения из ванны с фотополимером, и изделие строится слой за слоем.

В результате фотополимеризации в ваннах из пластмассоподобных материалов получают изделия с высокой детализацией и качеством поверхности, а достижения в области разработки новой фотополимерной смолы позволяют производить детали с достаточной оптической прозрачностью, которая подходит для печати прозрачных компонентов, таких как смотровые окна и даже линзы.

Следует отметить, что в результате фотополимеризации в ванне образуются каркасы из материала «поддержки» для поддержания любых нависающих или выступающих частей изделия. После завершения процесса построения этот вспомогательный материал необходимо удалить вручную, а изделие подвергнуть объемному постотверждению в УФ-печи для полного затвердевания материала (рис. 2.12).

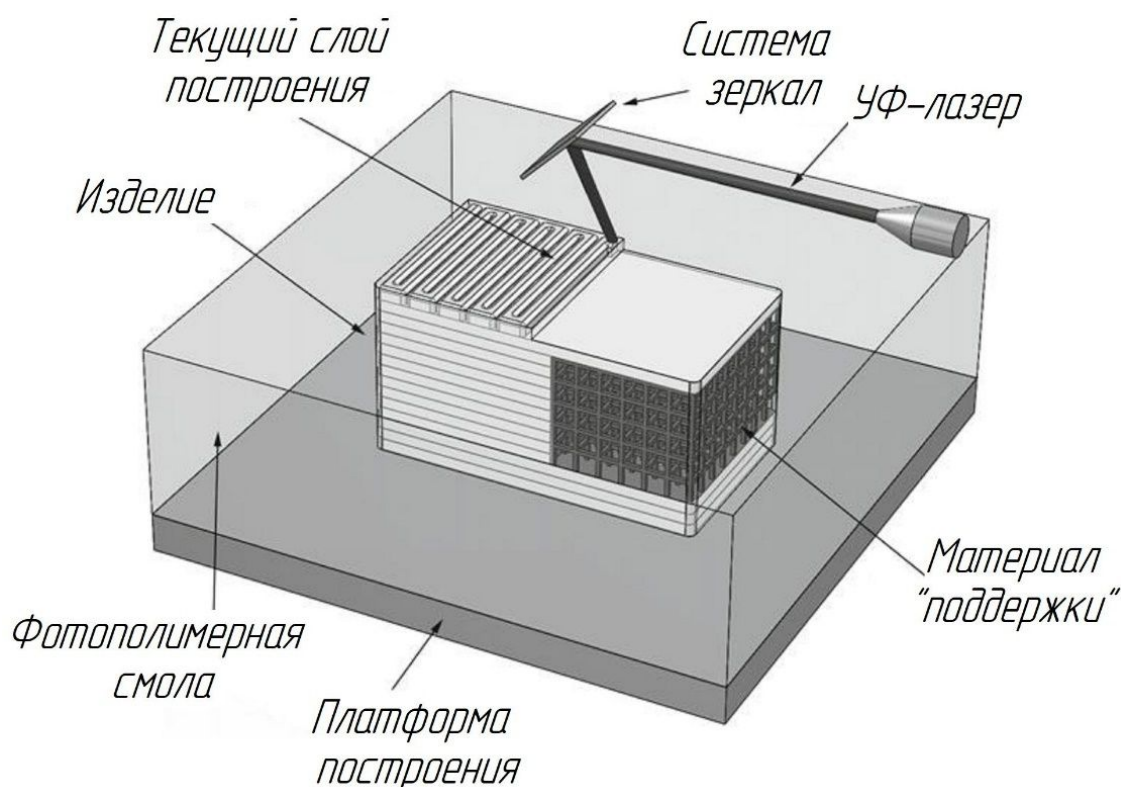


Рис. 2.12. Схема процесса на основе фотополимеризации в ванне

Как и в случае с технологиями на основе распыления материалов, детали подвержены разрушению, если оставлять их без защиты и подвергать воздействию окружающего УФ-излучения.

Наиболее распространенными областями применения категории технологий на основе фотополимеризации в ванне являются:

**при прототипировании:**

✓ большинство областей применения, где необходимы высокое качество и детализация поверхностей изделий из-за высокого уровня разрешения и высокой точности;

**при производстве:**

✓ области применения, в которых продукт не будет подвергаться воздействию УФ-излучения окружающей среды в течение длительного времени;

✓ заготовки для литья по выплавляемым моделям.

Категории технологий на основе фотополимеризации в ванне имеют свои преимущества и недостатки.

**Преимущества:**

✓ лучшее качество поверхности среди всех технологий БПИ (вместе с технологией распыления материала);

✓ возможность изготовления прозрачных деталей;

✓ позволяет создавать песчаные формы и стержни для изготовления металлических отливок;

✓ позволяет производить модели для литья по выплавляемым моделям из оргстекла.

**Недостатки:**

✓ свойства материала меняются со временем;

✓ смола является токсичной и может быть опасна при снятии изделий с машины и при постобработке;

✓ требуется материал «поддержки» для поддержания любых нависающих или выступающих частей изделия.

### ***2.3.6. Сплавление порошкового материала в заранее сформированном слое***

Категория технологий сплавления порошкового материала в заранее сформированном слое в контексте БПИ включает селективное лазерное спекание – Selective Laser Sintering (SLS), селективное лазерное плавление Selective Laser Melting (SLM) и электронно-лучевое плавление – Electron Beam Melting (EBM).

Все эти технологии включают в себя нанесение тонкого слоя основного строительного материала в виде порошка на платформу построения, последующее сканирование каждого сечения с помощью луча (лазера или электронного) и расплавление порошка в местах его воздействия. Затем платформа построения опускается на долю миллиметра и следующий слой порошка разравнивается по ней, и процесс воздействия луча повторяется; во время воздействия луч расплавляет текущий слой материала и связывает его с предыдущим слоем.

На сегодняшний день данные технологии позволяют производить изделия высокой прочности, которые относительно изотропны по своему поведению в направлениях  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . В направлении  $Z$  может наблюдаться некоторая анизотропия, но если деталь спроектирована непосредственно для БПИ, это можно свести к минимуму или устранить с помощью постобработки. Кроме того, эти технологии могут производить детали как из различных полимеров (в случае SLS), так и из металлов (в случае SLM и EBM).

Типичные полимеры, используемые в данных технологиях, включают в себя ряд полиамидных пластиков (нейлон) с рядом наполнителей: стекло, углеродное волокно, алюминий, а также высокотемпературные полимеры, например полиэфирэфиркетон. Пластмассовые изделия, если они спроектированы для БПИ, обладают свойствами, аналогичными изделиям, изготовленным литьем под давлением, и имеют возможность изготовления подвижных шарниров и сборок как одного целого. Качество поверхности изделия напрямую зависит от характеристик машины для БПИ.

Металлы включают в себя нержавеющей сталь, алюминий, титан, кобальт-хромовые сплавы, инструментальную сталь и многое другое. Металлические изделия, как правило, сопоставимы по качеству поверхности и прочностным характеристикам с изделиями, полученными литьем без каких-либо пустот, раковин или других дефектов. Следствием этого является то, что, как и любая литая деталь, полученная литьем, изделия требуют механической постобработки на станках с ЧПУ (рис. 2.13).

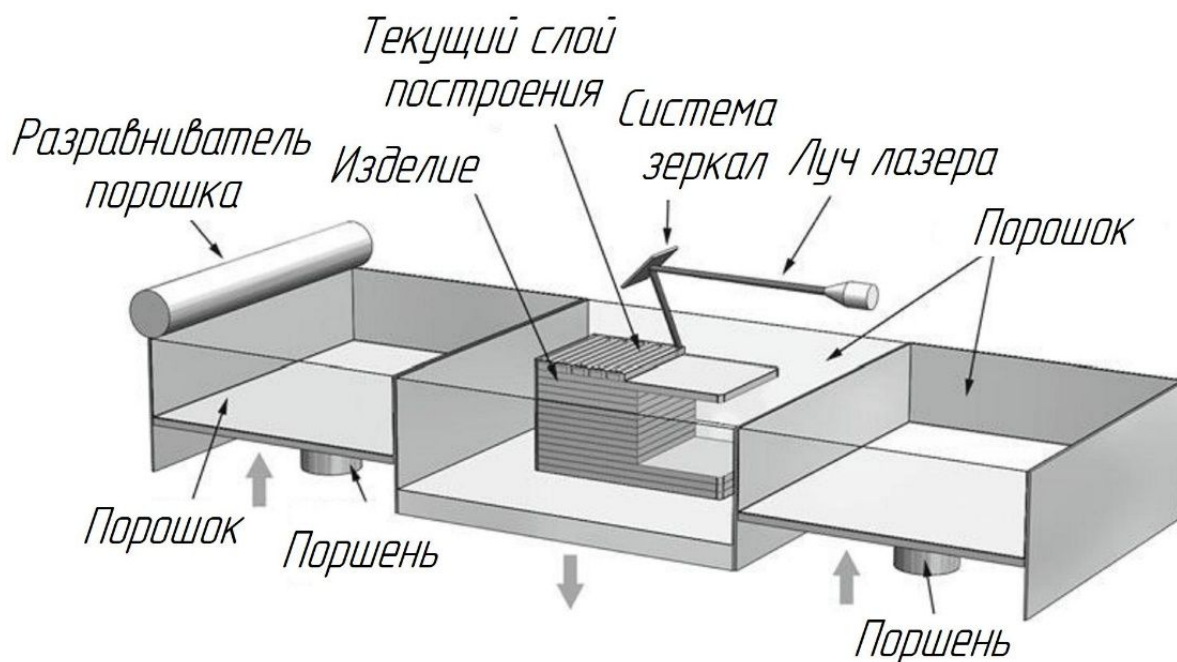


Рис. 2.13. Схема процесса на основе сплавления порошкового материала в заранее сформированном слое

Наиболее распространенными областями применения категории технологий на основе сплавления порошкового материала в заранее сформированном слое являются:

**при прототипировании:**

✓ большинство областей применения – от эргономичных до функциональных прототипов;

**при производстве:**

✓ технология на основе сплавления порошкового материала (как полимера, так и металла) в заранее сформированном слое является наиболее используемой технологией для производства деталей промышленного назначения;

✓ полистирол также используется для изготовления моделей для литья по выплавляемым моделям.

Категории технологий на основе сплавления порошкового материала в заранее сформированном слое имеют свои преимущества и недостатки.

**Преимущества:**

✓ с точки зрения использования материала признана одной из наиболее дешевых технологий;

✓ при использовании полимера не требуется дополнительный материал для «поддержки».

### **Недостатки:**

✓ при использовании металлов требуются «поддержки», изготавливаемые из того же материала, что и изделия для отвода тепла, это затрудняет их удаление.

### **2.3.7. Осаждение материала с помощью прямого подвода энергии**

Directed Energy Deposition (DED) – осаждение материала с помощью прямого подвода энергии – охватывает целую группу технологий. Это почти процесс БПИ в чистом виде, обычно используемый для ремонта или добавления дополнительного материала к существующим компонентам. Хотя все процессы БПИ можно рассматривать как процесс, обеспечивающий почти точную форму изделия, группа технологий DED производит значительно менее точные детали и с более низким качеством поверхности, чем большинство других технологий БПИ, поэтому часто требуется последующая обработка.

Типичная машина, работающая по принципу осаждения материала с помощью прямого подвода энергии, состоит из сопла, установленного на многоосевом манипуляторе, которое наносит порошок или проволочный материал на требуемую поверхность, и волновода для подвода энергии при плавлении порошка. Процесс в принципе аналогичен экструзии материала, но сопло может двигаться в нескольких направлениях и не фиксируется конкретной осью. Материал, который можно наносить под любым углом благодаря четырех- и пятиосевым машинам, расплавляется при воздействии лазерного или электронного луча. В качестве материала обычно используются металлы в виде порошка или проволоки (рис. 2.14).

Наиболее распространенными областями применения категории технологии осаждения материала с помощью прямого подвода энергии являются:

#### **при прототипировании:**

✓ обычно не используется для прототипирования;

#### **при производстве:**

✓ применение в областях, где возможно и допустимо использование нескольких операций;

✓ может использоваться для ремонта поврежденных или изношенных деталей.

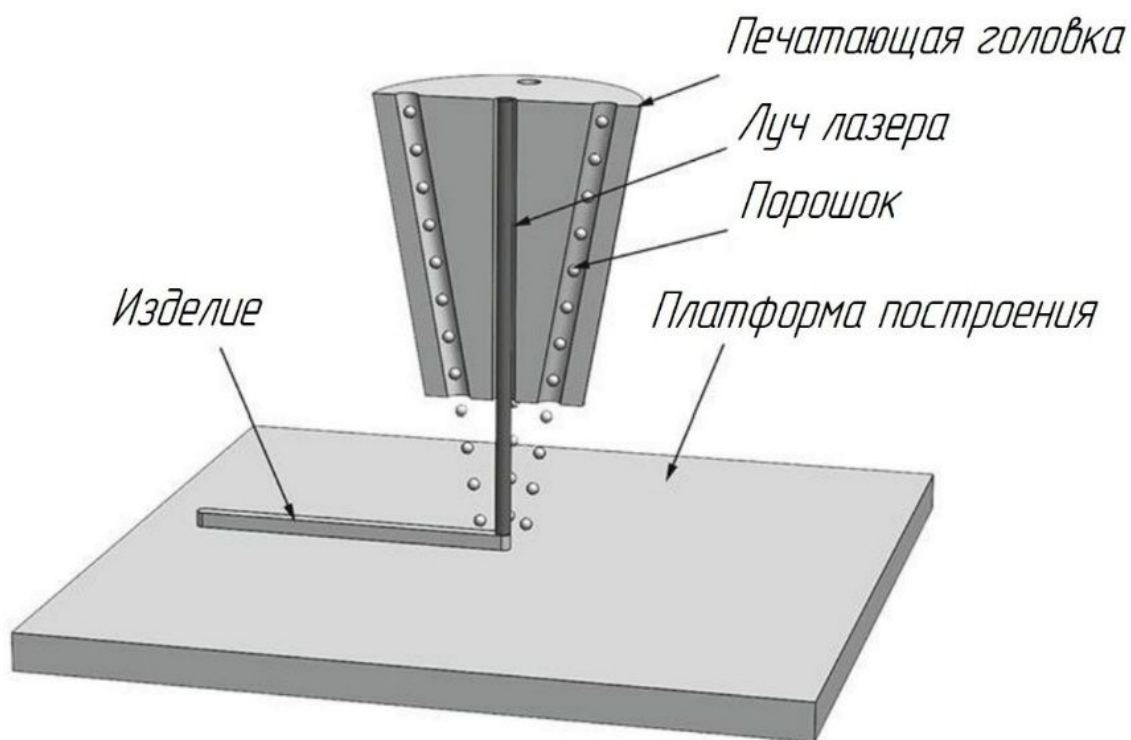


Рис. 2.14. Схема процесса осаждения материала с помощью прямого подвода энергии

Категории технологий осаждения материала с помощью прямого подвода энергии имеют свои преимущества и недостатки.

**Преимущества:**

- ✓ скорость процесса;
- ✓ возможность использования при обработке сложнопрофильных изделий за счет наличия многоосевого манипулятора.

**Недостатки:**

- ✓ необходимость в постобработке для получения требуемого качества поверхности.

### ***2.3.8. Гибридные технологии БПИ***

Гибридные аддитивные производственные системы представляют собой сочетание элементов процесса осаждения материала с помощью прямого подвода энергии с использованием порошка или проволоки, а также обработку на станках с ЧПУ в одной системе.

Основное преимущество гибридных систем в том, что это одна из немногих технологий, которая может производить готовые к использованию детали прямо на станке (исключая термообработку). К недостаткам данных систем можно отнести неизвестные до сих пор

факторы, оказывающие влияние на металлургические свойства изделий, так как последние подвергаются охлаждению (при механической обработке), и нагрев (при БПИ) в рамках одного процесса.

Для машин также требуется опытный оператор, обладающий знаниями в области пятиосевой обработки на станках с ЧПУ и процесса осаждения материала с помощью прямого подвода энергии. Выбор времени использования системных функций БПИ и функций ЧПУ по-прежнему в значительной степени выступает прерогативой оператора, который должен принимать решения по их применению. В данный момент разрабатывается программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс выбора, что упрощает применение гибридных технологий БПИ (рис. 2.15).

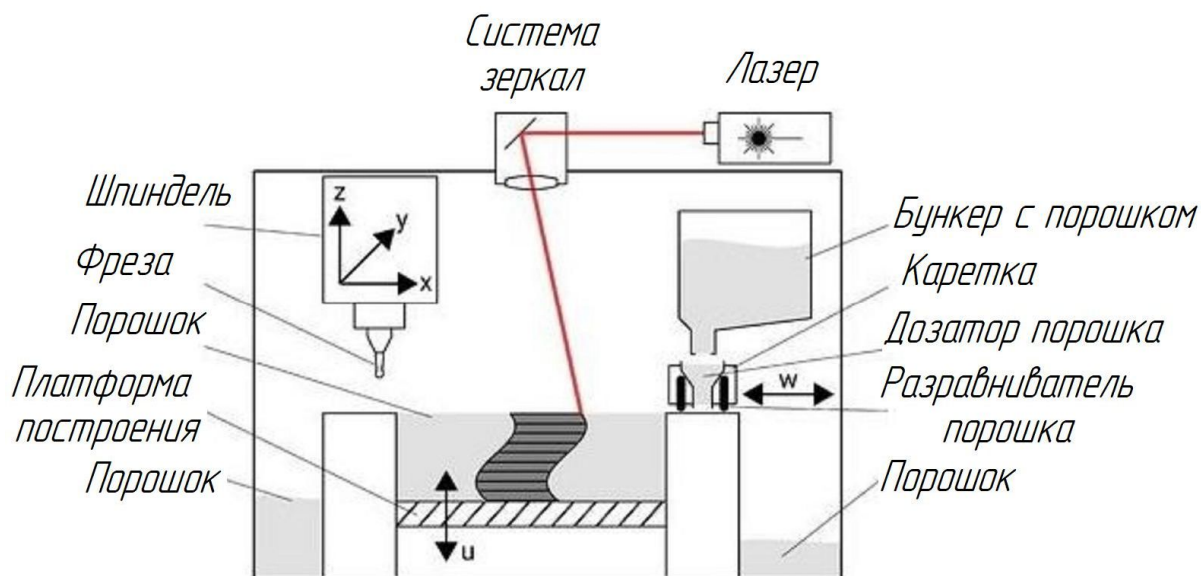


Рис. 2.15. Схема процесса на основе гибридных технологий

### Контрольные вопросы

1. Что такое аддитивное производство?
2. Что означает термин «синтез объемных изделий свободной формы»?
3. Как объяснить термин «послойный синтез»?
4. Что означает термин «трехмерная печать»?



5. Укажите причины многообразия терминов в области аддитивного производства.

6. Какими нормативными документами регламентируется сфера аддитивных технологий?

7. Приведите основные классификационные признаки аддитивных технологий.

8. Как классифицируются аддитивные технологии по виду энергетического воздействия (виду материала изделия, методу формирования слоя и др.)?

9. Перечислите основные категории аддитивных технологий.

10. Каковы основные преимущества и недостатки категории технологий экструзии материалов?

11. Назовите наиболее распространенные области применения категории технологий на основе распыления основного материала.

12. Приведите схему процесса на основе листового ламинирования.

## Глава 3. МЕТОДЫ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

### 3.1. Методы фотополимеризации

Данная группа методов основана на фотоинициированной УФ-излучением или излучением видимого диапазона полимеризации некоторых композиций, называемых фотополимеризующимися. В литературе по БПИ их чаще называют фоточувствительными полимерами [11], или просто фотополимерами. Некоторые современные фотополимеры по механическим свойствам аналогичны АБС-пластику, поликарбонату, полипропилену, полиэтилену низкого давления и другим конструкционным полимерам [13, 26]. К настоящему времени насчитывается более десятка различных методов послойного синтеза, основанных на фотополимеризации. Из них наибольшее распространение получили способы векторно-сканирующего отверждения (Vector Scan Stereolithography), отверждения проецированием (Mask Projection Photopolymerization Technologies), двухфотонная стереолитография (Two-photon SL) [18] и печать с фотохимическим отверждением.

#### *3.1.1. Векторно-сканирующее отверждение*

Сущность метода состоит в послойном отверждении локальных участков фоточувствительного полимера при воздействии на его поверхность излучения, совершающего сканирующие движения, в соответствии с формой текущего сечения (слоя) модели. Векторно-сканирующее отверждение, осуществляемое посредством лазерного излучения, называют стереолитографией – StereoLithography Apparatus (SLA). Типичная установка стереолитографии работает следующим образом (рис. 3.1) [27, 28].

В емкости (ванной), наполненной жидким фотополимером, находится платформа построения, способная перемещаться в вертикальном направлении. При формировании первого слоя платформа поднимается на высоту, при которой расстояние от нее до поверхности составляет величину, достаточную для отверждения слоя. Луч от УФ-лазера зеркалами направляется в требуемую точку на поверхности полимера. Под действием излучения локальный участок полимеризуется (отверждается), образуя некоторый объем создаваемой модели.

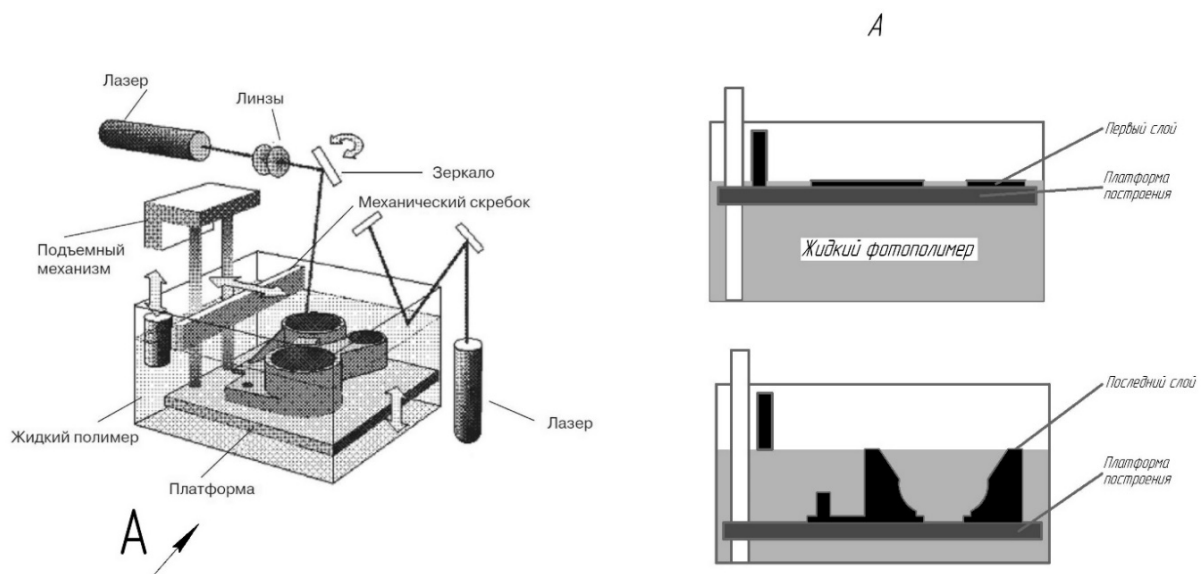


Рис. 3.1. Схема типичной установки стереолитографии

Луч лазера, переходя по заданной траектории, формирует единственный отвержденный слой, соответствующий сечению формируемого изделия. Для отверждения следующего слоя платформа опускается на величину толщины слоя над поверхностью фотополимера и проходит специальный механический скребок (лезвие), выравнивающий его поверхность. Далее процесс повторяется до тех пор, пока не будет получено изделие целиком.

Используемые фотополимеры токсичны и светочувствительны, поэтому емкость с фотополимером защищают от света, а установку оснащают проточной вентиляцией [11]. После отверждения последнего слоя изделие извлекается и, поскольку в его локальных полостях может оставаться неотвержденный фотополимер, помещается под мощные УФ-лампы или в печь, после чего материал теряет свою токсичность.

В большинстве случаев модели необходимо дополнять поддерживающими структурами («поддержками») [11, 29] (рис. 3.2) с целью предотвращения деформации слоев под собственным весом и расслаивания модели на сложных участках. В дальнейшем поддерживающие структуры удаляются, как правило, механическим способом (рис. 3.3). Процесс постобработки может также включать полирование модели, окраску или гальванопластику (рис. 3.4).

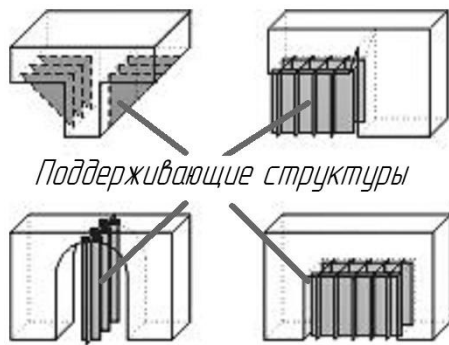


Рис. 3.2. Примеры использования поддерживающих структур

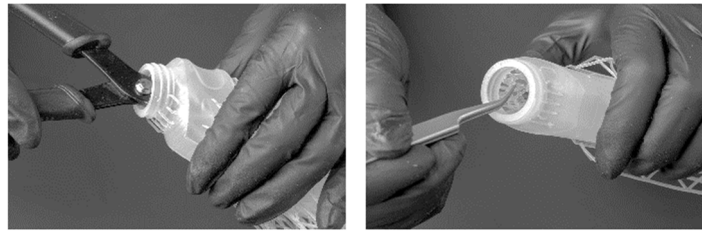


Рис. 3.3. Удаление поддерживающих структур



Рис. 3.4. Изделие, полученное стереолитографией до постобработки и после постобработки гальванопластикой

Патент на метод стереолитографии принадлежит компании «3D Systems Corp.» (США), которая является лидером рынка в данном классе устройств. Подобные установки выпускает и ряд японских производителей: «Denken Engineering», «СМЕТ», «Sony», «Meiko Corp.», «Mitsui Zosen», «Teijin Seiki» [18]. В Европе крупнейшим поставщиком данной технологии выступает компания «EOS GmbH» (Германия).

### 3.1.2. Отверждение проецированием

Сущность метода состоит в последовательном отверждении слоев фоточувствительного полимера путем экспонирования его поверхности УФ-излучением или другими видами излучения, засвечивающего участки поверхности фотополимера, соответствующие форме текущего слоя. В ранних реализациях метода проекции создавались при помощи масок. Впервые патент на подобную технологию получил Е. В. Фудим (E. V. Fudim, США, выходец из СССР) в 1988 г. [30]. Экспонирование осуществлялось через маски, напечатанные на пленке при помощи фотоплоттера. Типичным представителем данного метода считается технология отверждения на твердом основании (SGC – Solid Ground Curing), разработанная и реализованная компанией «Cubital. Ltd.» (Израиль) [11, 27]. Схема установки приведена на рис. 3.5.

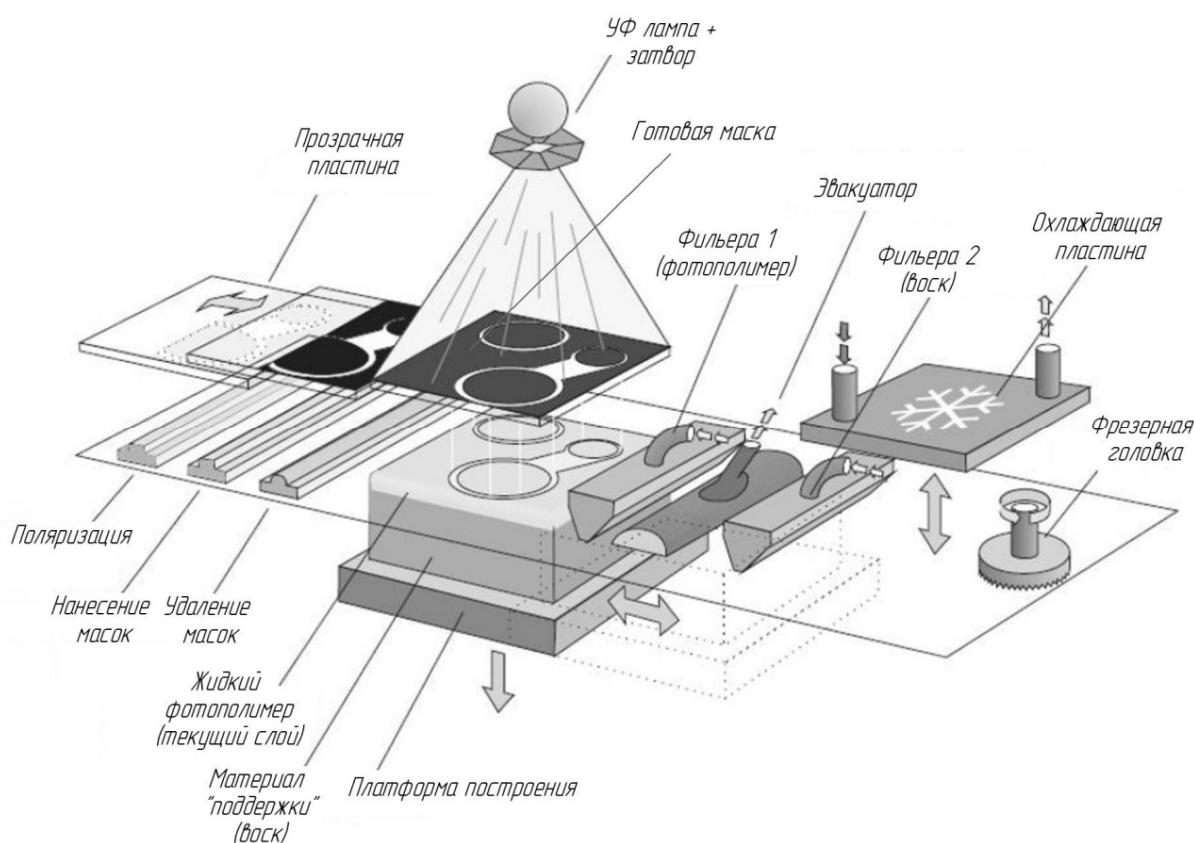


Рис. 3.5. Схема установки SGC

Цикл работы установки SGC состоит из следующих этапов [28]:

1. Платформа из крайнего правого положения перемещается в зону экспонирования. При ее прохождении под фильерой 1 на платформу наносится фотополимер.

2. На прозрачной пластине методом электростатического переноса формируется маска, представляющая собой негативное изображение сечения текущего слоя формируемой модели. Пластина с маской помещается в зону экспонирования.

3. Открывается затвор. Излучение от УФ-лампы, проходя через маску, падает на поверхность фотополимера, отверждая его участки в соответствии с формой текущего сечения модели.

4. Затвор закрывается. Пластина с маской выходит из зоны экспонирования, маска уничтожается.

5. Платформа начинает перемещаться в крайнее правое положение. При ее прохождении под эвакуатором с поверхности аэродинамическим методом удаляются остатки жидкого полимера. При прохождении платформы построения под фильерой 2 на поверхность наносится расплавленный воск, использующийся в качестве поддерживающей структуры (поддержки). Далее опускается охлаждающая пластина, воск застывает. Фрезерная головка срезает излишки воска и отвержденного фотополимера, обеспечивая точность толщины слоя.

6. Далее платформа построения перемещается в обратном направлении. При прохождении под эвакуатором с поверхности удаляются остатки срезанного воска и фотополимера.

Для формирования следующего слоя цикл повторяется. После завершения процесса полученное тело (модель и поддерживающая структура) извлекается, воск вытапливается в ванне с горячей водой. Постобработка излучением или нагревом, подобно используемой в стереолитографии, не требуется. SGC-процесс характеризуется высочайшей автоматизацией и производительностью.

Проекции могут создаваться без использования масок при помощи жидкокристаллических дисплеев или пространственных модуляторов света (Spatial Light Modulator – SLM). В современных моделях подобных устройств для создания проекции используют цифровые микрозеркальные устройства (DMD – Digital Micromirror Device).

Объединенные в единую матрицу DMD называют Digital light Processor (DLP). В качестве поддерживающих структур часто приме-

няют гелеобразные составы, удаляемые при постобработке струей воды. Лидерами в производстве установок отверждения фотополимеров проецированием через маску являются компании «EnvisionTEC GmbH» (Германия) и «3D Systems Corp.» (США) [18].

### 3.1.3. Печать с фотохимическим отверждением

Сущность печати с фотохимическим отверждением состоит в том, что форма изделия создается путем нанесения слоев фотополимера требуемой формы с их дальнейшим отверждением. Типичным представителем печати с фотохимическим отверждением является технология Polyjet Matrix™. Сущность технологии заключается в следующем (рис. 3.6) [18, 31]: подвижный печатающий узел содержит несколько печатающих головок, способных наносить фотополимеры и вещество «поддержки» в соответствии с формой текущего слоя. Излучение УФ-лампы, встроенной в печатающий узел, отверждает фотополимер и обращает в гель вещество «поддержки».

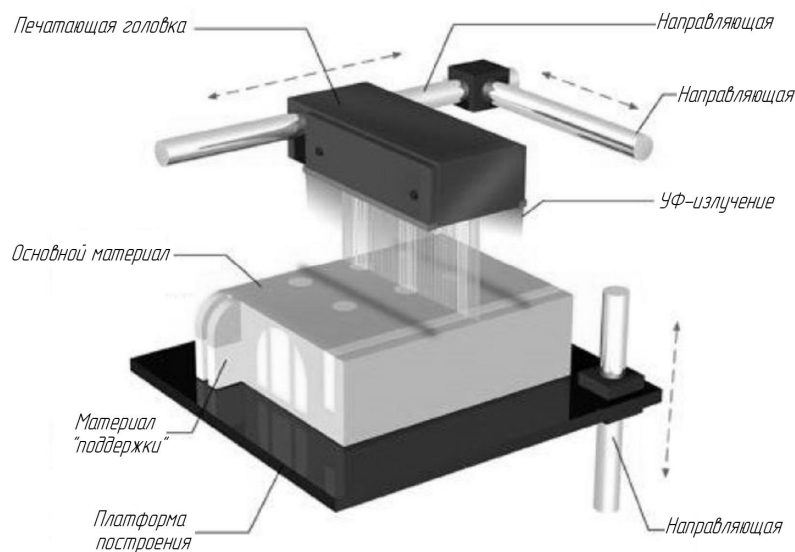


Рис. 3.6. Схема процесса Polyjet Matrix™

Изделие формируется на платформе, которая при переходе к каждому следующему слою опускается вниз. Готовое изделие не требует дополнительной выдержки под УФ-излучением или нагрева. Гелеобразная поддержка удаляется вручную или с помощью воды.

Преимуществами такого процесса следует считать возможность создания композиционных изделий и окрашенных изделий с градиентом цвета; изделия не требуют дополнительной выдержки под ультрафиолетом или нагрева. Лидером по выпуску 3D-принтеров с фотохимическим отверждением признана компания «Objet Geometries Ltd.» (Израиль).

### ***3.1.4. Механизм фотополимеризации***

Фотополимеры были разработаны в 1930-х гг. и изначально использовались в полиграфии и в качестве фоторезисторов в микроэлектронике. Процесс нанесения на требуемые участки поверхности слоя материала-фоторезистора получил название фотолитографии и по сути представляет собой стереолитографию с единственным слоем [18].

Полимеризующиеся композиции могут отверждаться при воздействии на них видимого света, УФ-излучения, электронного луча, рентгеновского, инфракрасного и гамма-излучения. В коммерческих аддитивных технологиях наибольшее распространение получили материалы, чувствительные к УФ-излучению и видимому свету.

Фотополимеризующиеся композиции состоят из реакционно-способных мономеров и олигомеров, а также фотоинициаторов с добавлением различных растворителей, пластификаторов и стабилизаторов [18]. Реакция фотоиницированной полимеризации может протекать по одному из двух механизмов: свободно-радикальному и катионному [32, 33].

*Радикальная полимеризация основана* на механизме генерации свободных радикалов из вещества фотоинициаторов, вызывающих цепную реакцию. При радикальной полимеризации фотоинициатор после облучения лазером поглощает энергию фотона и производит свободные радикалы вследствие расщепления своего возбужденного состояния. Ввиду того что каждая молекула мономера имеет хотя бы две двойные связи акрилата, полимеризация распространяется в объеме, сшивая мономеры в полимерную сеть.

*Катионная полимеризация* осуществляется в присутствии соединений, распадающихся под действием излучения на реакционно-способные катионы и стабильные анионы [34]. Катионная полимеризация использует активный катионный фотоинициатор, который об-




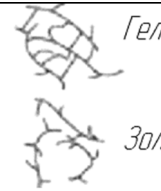

лучается ультрафиолетом в присутствии молекулы-донора водорода. При катионной полимеризации не ингибируется кислород, а склонность к усадке гораздо меньше. Реакция полимеризации продолжается, даже если прекращается воздействие УФ-излучения (темновая реакция). Эта особенность значительно увеличивает прочностные свойства полуфабриката (green part). Реакционная способность их существенно выше, чем у акриловых олигомеров, у которых слабая темновая реакция и низкая прочность. Однако кинетика катионной полимеризации имеет сложный характер, не до конца еще изучена и сильно зависит от формулы олигомера.

Фотополимеризация – процесс, протекающий во времени, в котором можно выделить ряд стадий (табл. 3.1): стадию жидкой фазы, стадию увеличения вязкости, стадии гелеобразования и отверждения.

Рост молекулярных цепочек в фотополимерах под воздействием активирующего излучения сначала приводит к увеличению вязкости фотополимера. Затем композиция теряет текучесть. В этот момент композиция состоит из двух фаз: геля – нерастворимой фазы, имеющей механические свойства твердого тела, и золя – растворимой фазы. При дальнейшем воздействии содержание геля увеличивается, а содержание золя сокращается с последующим образованием сшитого полимера и переходом вещества в застеклованное состояние. Возможность получения гелеобразного вещества используется в ряде технологий для создания поддерживающих структур, удаляемых впоследствии растворителями (например, технология «Polyjet Matrix™»).

Таблица 3.1

Стадии фотополимеризации

| Стадия                                      | Состояние материала    | Изображение   | Переход состояния   |   |
|---|------------------------|---|---|---|
| 1. Жидкий фотополимер                       | Мономеры/<br>олигомеры |  | Переход<br>из жидкого<br>в высоко-<br>эластичное<br>состояние | –   |
| 2. Увеличение вязкости жидкого фотополимера |                        |   |   | Переход<br>из эла-<br>стичного<br>в застек-<br>лованное<br>состоя-<br>ние |
| 3. Гелеобразование                          | Гель + золь            |  |   |   |
| 4. Отверждение                              | Сшитый полимер         |  | –   |   |

### 3.1.5. Взаимодействие актиничного излучения с фотополимеризующимися композициями

Для фотополимеризации необходимо воздействие на фотополимер активного излучения, способного вызвать в фотополимере процессы, инициирующие полимеризацию. При прекращении воздействия реакция полимеризации затухает. В аддитивных технологиях источниками актиничного излучения служат лазеры, а также различные лампы. Наиболее часто используются гелий-кадмиевые, аргоновые, неодимовые, ХеСl-, КrСl- и СО<sub>2</sub>-лазеры.

При описании взаимодействия актиничного излучения лазера на фотополимер последнее описывают близким к гауссовскому пучку и представляют образование отдельных дорожек (треков) отвержденного полимера, как показано на рис. 3.7.

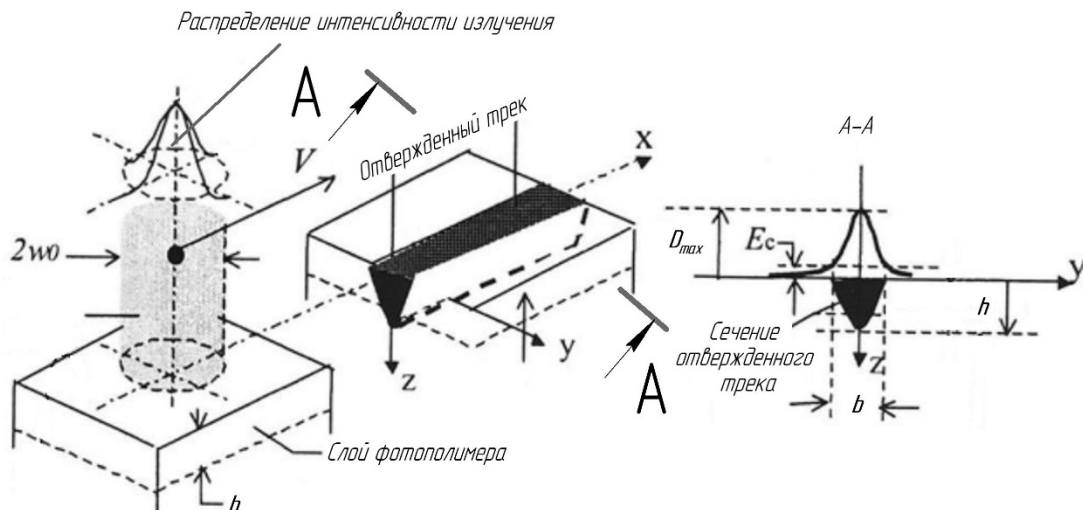


Рис. 3.7. Схема образования отдельного трека при стереолитографии [35, 36]

Толщина трека, образующегося на поверхности фотополимера в результате экспозиции, удовлетворительно описывается уравнением следующего вида [36], мм:

$$h = D_p \ln \left( \frac{D}{E_c} \right), \quad (3.1)$$

где  $D_p$  – эффективная глубина проникновения излучения в фотополимер, мм;  $D$  – доза облучения, мДж/см<sup>2</sup>;  $E_c$  – критическая доза облучения, мДж/см<sup>2</sup>.

Интенсивность излучения на поверхности фотополимера подчиняется нормально-круговому закону (при условии перпендикулярности оси пучка к поверхности фотополимера), Вт/м<sup>2</sup>,

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right),$$

где  $I_0$  – интенсивность излучения на оси пучка, Вт/м<sup>2</sup>;  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  – расстояние до центра пучка, мм;  $w_0$  – радиус пучка, мм.

Зависимость интенсивности излучения при его распространении вглубь фотополимера описывают законом Бугера – Ламберта – Бера, Вт/м<sup>2</sup>,

$$I(z) = I_0 \exp(-\alpha z),$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения, мм<sup>-1</sup>;  $z$  – расстояние до поверхности фотополимера, мм.

При наличии подвижного источника излучения доза облучения в сечении, перпендикулярном к направлению движения, определяется выражением, Вт/м<sup>2</sup>,

$$D(y, z) = \frac{P}{vw_0\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-y^2}{w_0^2} - \alpha z\right) 10^{-2}, \quad (3.2)$$

где  $P$  – мощность излучения, Вт;  $v$  – скорость движения пучка лазера, м/с.

Отверждение будет наблюдаться в областях фотополимера, для которых справедливо условие

$$D(y, z) \geq E_c. \quad (3.3)$$

Из выражений (3.1) – (3.3) следует, что толщина отвержденного трека в сечении  $y = 0$  может быть определена как, мм,

$$h = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{D}{E_c}.$$

Ширина трека определяется из выражения, мм,

$$b = 2w_0 \sqrt{\ln \frac{D}{E_c}}.$$

Граница отвержденной области описывается параболой следующего вида:

$$\frac{-y^2}{w_0^2} + \alpha z = \text{const.}$$

Доза облучения  $D$  зависит от мощности излучения  $P$ , радиуса пучка  $w_0$  и скорости движения пучка лазера  $v$ , мДж/см<sup>2</sup>,

$$D = \frac{P}{vw_0\sqrt{\pi}} 10^{-2}.$$

При формировании слоя расстояние между соседними треками (шаг  $S$ ) принимается меньшим, чем их ширина  $b$  (рис. 3.8).

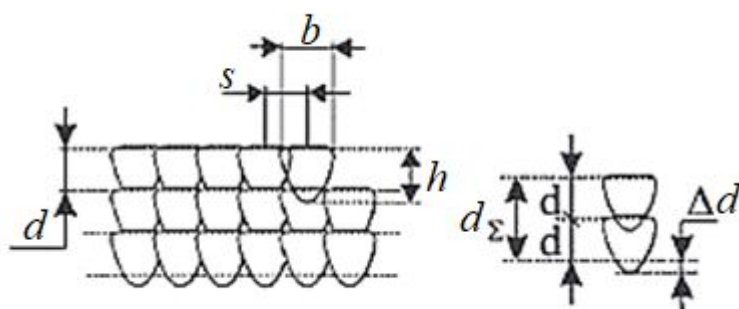


Рис. 3.8. Схема формирования слоев

Также и при формировании нескольких слоев толщина слоя  $d$  принимается меньше, чем высота образующихся треков  $h$ . Возникающая величина перекрытия  $\Delta d$  добавляется к высоте изделия  $d_{\Sigma}$ .

### **3.1.6. Погрешности, возникающие в процессе фотополимеризации**

Как было изложено выше, фотополимеризация сопровождается усадкой, причем 50 – 70 % от общей усадки образуется при формировании изделия, а остальная часть – при его постобработке. Величина усадки зависит от вида фотополимера, способа построения изделия и параметров процесса [35]. Усадка является доминирующей причиной погрешностей процесса.

В целом погрешности, возникающие в процессе фотополимеризации, принято разделять на две группы [37]:

- 1) погрешности, возникающие непосредственно в процессе формирования изделия («зеленые» погрешности);
- 2) погрешности постотверждения.

Данные погрешности добавляются к систематическим погрешностям, свойственным любому процессу послойного синтеза. Усадка приводит к неравномерному изменению уровня фотополимера при построении модели, что вызывает необходимость использования устройств контроля и поддержания уровня фотополимера. Более сложной проблемой является то, что усадка в изделии протекает неравномерно, это приводит к короблению изделия. Наиболее ярко данный эффект наблюдается для консольных элементов изделия (рис. 3.9).

Первый консольный слой (рис. 3.9, а) формируется при отсутствии деформаций (вследствие напряжений, вызванных усадкой, первый слой будет деформироваться вниз на небольшую величину). При формировании последующего слоя, скрепленного с первым консольным, вследствие усадки возникает изгибающий момент, способный деформировать на величину  $\delta$  консольный элемент изделия так, что край верхнего слоя приподнимается над поверхностью фотополимера (рис. 3.9, б). Вследствие последнего при формировании следующего слоя над деформированным участком будет находиться меньшая толщина фотополимера ( $\Delta_1$ ), чем над остальными ( $\Delta$ ) (см. рис. 3.9, в), что приведет к эффекту самовыравнивания. В итоге после формирования достаточно большого количества слоев верхняя поверхность изделия будет относительно ровной, в то время как нижняя часть консольного элемента будет иметь искажение (рис. 3.9, г).

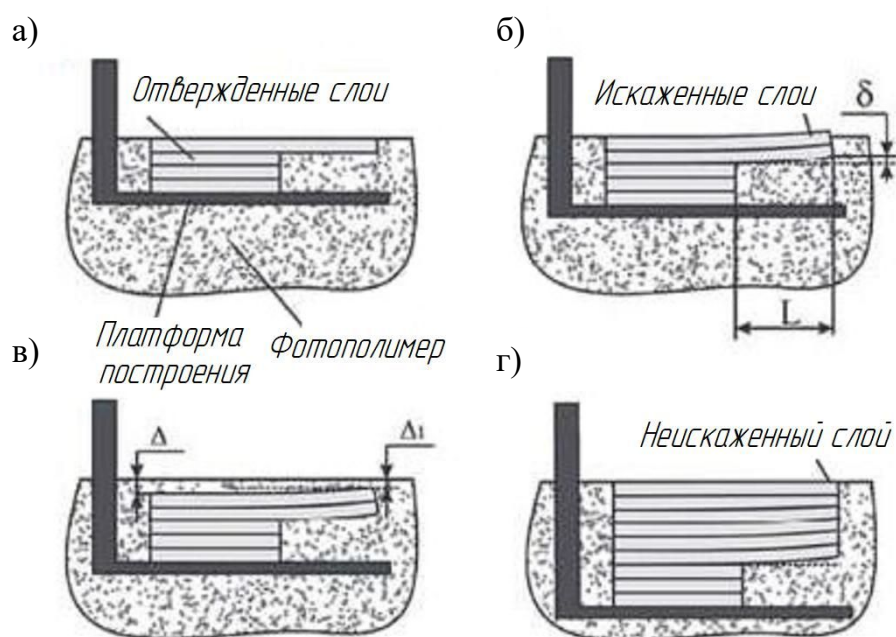


Рис. 3.9. Формирование погрешности консольных элементов [33]:  
а – после отверждения первого слоя; б – после отверждения второго слоя; в – перед формированием третьего слоя; г – после отверждения большого количества слоев

Для количественной оценки короблений при фотополимеризации используют относительную величину  $C_f = \frac{\delta}{F} 100 \%$ . Описанные выше коробления характерны не только для консольных элементов

изделий, но и для других нежестких элементов. Напряжения, возникающие в изделиях, могут быть сильны настолько, что способны их разрушить. Величина короблений зависит от усадки фотополимера и геометрии изделия. Ч. Халл предложил круговую модель для количественной связи усадки и коробления (рис. 3.10). Слой, отверждаемый поверх ранее сформированного, первоначально находится в гелеобразном состоянии. При его полимеризации в слоях возникают напряжения: в нижнем – напряжения сжатия, в верхнем – напряжения растяжения. В результате консоль деформируется с радиусом кривизны  $R$ .

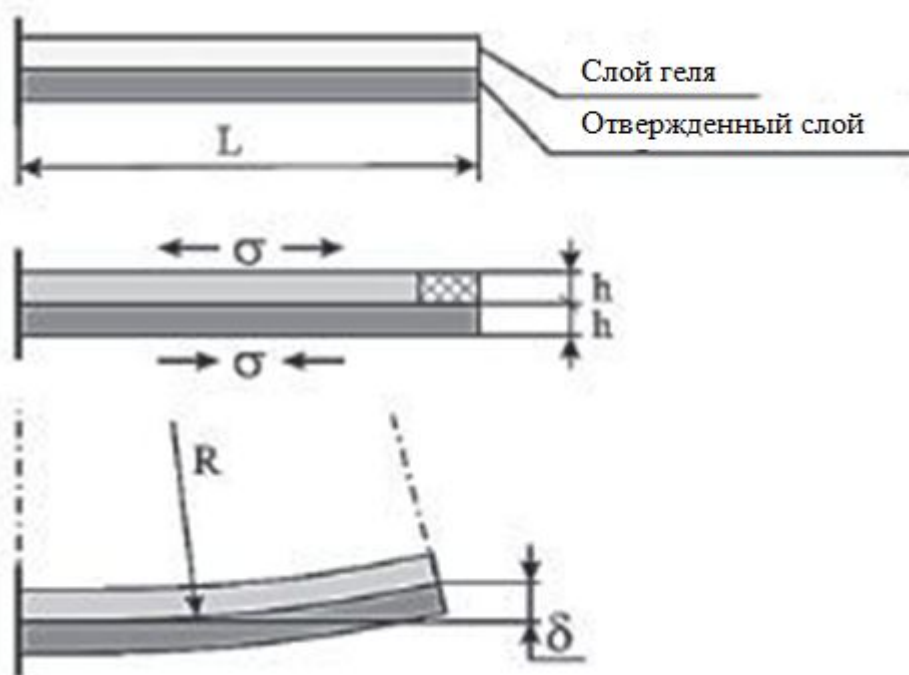


Рис. 3.10. Круговая модель коробления при фотополимеризации

В такой модели поведение отверждаемой консоли аналогично поведению биметаллической пластины при ее нагреве [33]. В случае если толщина слоев постоянна, радиус кривизны находят по формуле, мм,

$$R = \frac{h}{\varepsilon},$$

где  $h$  – толщина слоев, мм;  $\varepsilon$  – коэффициент усадки.

Величина коробления определяется из выражения, мм:

$$\delta = R \left(1 - \cos \left(\frac{L}{R}\right)\right),$$

где  $L$  – длина консоли, мм.

В случае если  $L/R \ll 1$  можно использовать приближенно, то формула для определения величины короблений, мм,

$$\delta \approx \frac{\varepsilon L^2}{2h}.$$

Для снижения коробления используют следующие основные приемы:

1. Увеличение экспозиции – снижение скорости движения пятна лазера и увеличение его мощности с целью полной полимеризации участка, находящегося под пятнами лазера.

2. Использование фотополимера с большими скоростями полимеризации.

3. Использование фотополимера с низкими значениями усадки.

4. Увеличение толщины слоев.

Обязательное условие формирования изделий с минимальными короблениями фотополимера – рациональное использование поддерживающих структур и стратегий формирования.

Еще одной причиной погрешностей методов фотополимеризации является разбухание. Разбухание – результат того, что фотополимер может быть абсорбирован отвержденными объемами изделия [35, 37]. П. Ф. Джэйкобс (Р. Ф. Jacobs) предложил следующую количественную оценку разбухания:

$$SW = \frac{M_{24} - M_0}{M_0} 100 \%,$$

где  $M_{24}$  – линейный размер элемента после 24 ч нахождения его в фотополимере;  $M_0$  – линейный размер элемента непосредственно после его отверждения.

Также разбухание наблюдается при воздействии на готовое изделие растворителей при удалении с его поверхности остатков фотополимера.

Помимо погрешностей, связанных с химическими превращениями в фотополимере, на точность формируемых изделий существенное влияние оказывают процессы нанесения слоев фотополимера.

### ***3.1.7. Стратегии формирования сечений***

Для способов векторно-сканирующего отверждения существует бесконечное множество траекторий движения пятна излучения, формирующего текущий слой. Траектории рассчитывают таким образом,

чтобы пятно проходило по контуру текущего сечения изделия с учетом коррекции на ширину трека с дальнейшим заполнением площади сечения линиями, образующими сетку. Причем сетка обычно образует ячейки, внутри которых фотополимер остается неотвержденным (окончательное отверждение выносится на постобработку). Характер траекторий, основанный на определенных принципах их построения, называют стратегией формирования, или стилем решетки, или стилем построения. Выбор той или иной стратегии оказывает непосредственное влияние на качество формируемого изделия.

Наиболее известны следующие стратегии: трехлинейная решетка (Tri-hatch), «WEAVE™», «STAR-WEAVE™», ACES™, а также «QuickCast™» [29, 33, 37]. Наиболее простыми стратегиями являются трехлинейная решетка и «WEAVE», в которых для каждого слоя принцип построения решетки одинаков.

В трехлинейной решетке (рис. 3.11, а) сечение слоя заполняется тремя наборами параллельных линий: линий, параллельных оси  $X$ ; линий, проходящих под углом  $60^\circ$  к оси  $X$ ; линий, проходящих под углом  $120^\circ$  к оси  $X$ . В результате образуется решетка, состоящая из равносторонних треугольников. Шаг линий, как правило, составляет величину до 0,05 дюйма ( $\approx 1,27$  мм) [29, 38]. Подобная стратегия имеет следующие недостатки [37, 38]:

- ✓ в ячейках решетки остается слишком большое количество неотвержденного фотополимера;
- ✓ значительные искажения при постотверждении;
- ✓ требуется гладкость вертикальных поверхностей изделий.

В настоящее время такая стратегия практически не используется в стереолитографии.

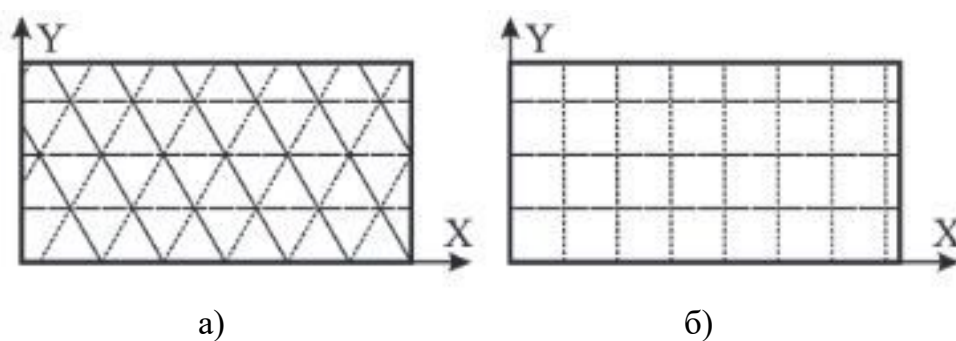


Рис. 3.11. Стратегии формирования:  
а – трехлинейная решетка (Tri-hatch); б – «WEAVE™»



Стратегия «WEAVE™» (рис. 3.11, б) заключается в заполнении сечения слоя двумя наборами параллельных линий, один из которых параллелен оси  $X$ , а второй – оси  $Y$ . Шаг линий принимается меньшим, чем при трехлинейной решетке, и зависит от толщины слоя [29, 33, 38]. В сравнении с трехлинейной решеткой «WEAVE™» обеспечивает более высокую точность за счет снижения короблений [18, 29], однако имеет следующие недостатки [37]:

- ✓ значительные погрешности в углах слоя;
- ✓ появление микротрещин.

Стратегия STAR-WEAVE™ (SW) (рис. 3.12) является модификацией WEAVE™. Внесено три изменения: чередование последовательности шахматная решетка и укороченная решетка. Чередование последовательности (рис. 3.12, а) заключается в том, что от слоя к слою меняется очередность формирования наборов линий, параллельных  $X$  и  $Y$ . К примеру, в нечетных слоях в первую очередь формируются линии, параллельные оси  $Y$ , а в четных слоях в первую очередь формируются линии, параллельные оси  $X$ . Кроме того, может чередоваться направление линий: в одних слоях линии формируются в положительном направлении оси координат, в других – в отрицательном. Шахматная решетка (рис. 3.12, б) подразумевает смещение линий на величину, равную половине шага между ними для каждого последующего слоя. Укороченная решетка в отличие от обычной (рис. 3.12, в) подразумевает, что заполняющие сечение линии смыкаются с границей слоя только с одной стороны, в то время как с другой остается зазор около 0,01 дюйма ( $\approx 0,25$  мм) [33]. Кроме того, от линии к линии чередуются стороны, к которым примыкают линии.

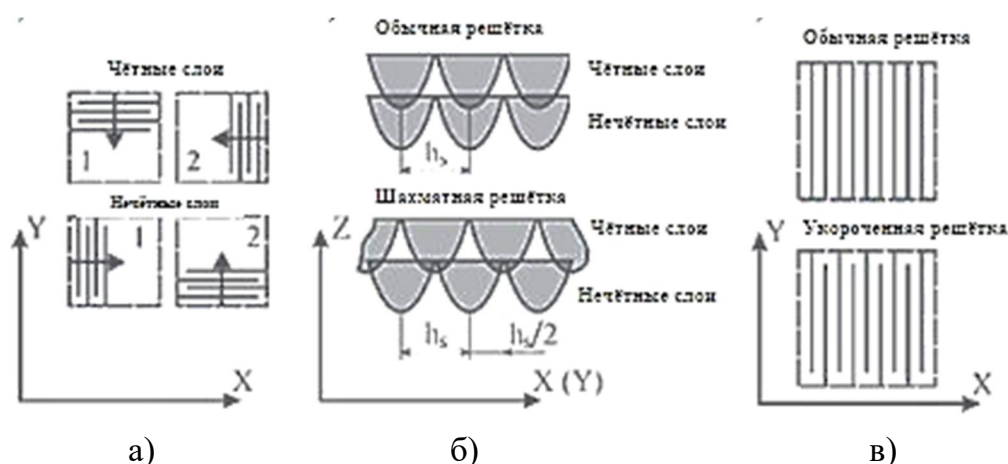


Рис. 3.12. Стратегия STAR-WEAVE™: а – чередование последовательности; б – шахматная решетка в сравнении с WEAVE™; в – укороченная решетка в сравнении с WEAVE™

Использование шахматной решетки позволяет избежать возникновения микротрещин. В целом стратегия STAR-WEAVE™ позволяет снизить внутреннее напряжение, что уменьшает риск возникновения макротрещин и обеспечивает высокую точность при использовании фотополимера на основе акрилатов. Из недостатков данной стратегии обычно указывают неравномерную экспозицию слоев фотополимера излучением.

Также были разработаны вариации STAR-WEAVE™ – стратегия Divergent STAR-WEAVE™ (DSW) и Diagonal Divergent STAR-WEAVE™ (DDSW) [48, 49]. Изменения коснулись порядка заполнения сечения слоя. Сущность DSW заключается в том, что заполнение слоя начинается не с края, как в STAR-WEAVE™, а с середины сечения (рис. 3.13, а). В стратегии DDSW (рис. 3.13, б) заполнение ведется линиями под углом 45° по отношению к осям координат. Данные изменения внесены с целью уменьшения остаточных напряжений в формируемом изделии и повышения стабильности его размеров.

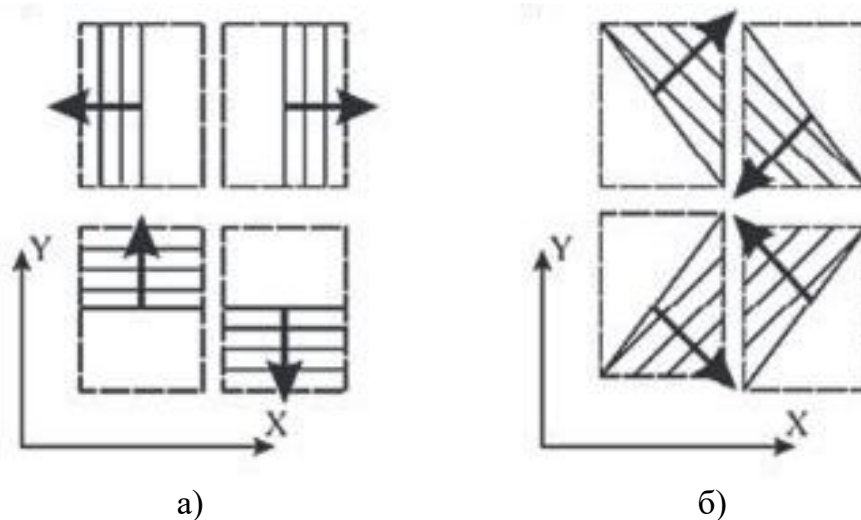


Рис. 3.13. Заполнение слоя в стратегиях:  
а – Divergent STAR-WEAVE™; б – Diagonal Divergent STAR-WEAVE™

Стратегия ACES™ (Accurate Clear Epoxy Solid) заключается в полной и однородной полимеризации изделия в процессе его формирования [18, 33, 37]. Разработана для повышения точности и качества поверхности изделий, формируемых из фотополимера на основе эпоксидов. Для минимизации короблений используется прогрессивное отверждение, при котором фотополимер полностью отверждается, прежде чем свяжется со следующим слоем. В ACES™ расстояние

между соседними проходами пятна лазера выбирается в зависимости от радиуса пятна лазера –  $h_s = (0,5 - 1) w_0$ , при этом толщина отверждаемого слоя определяется по схеме, приведенной на рис. 3.14.

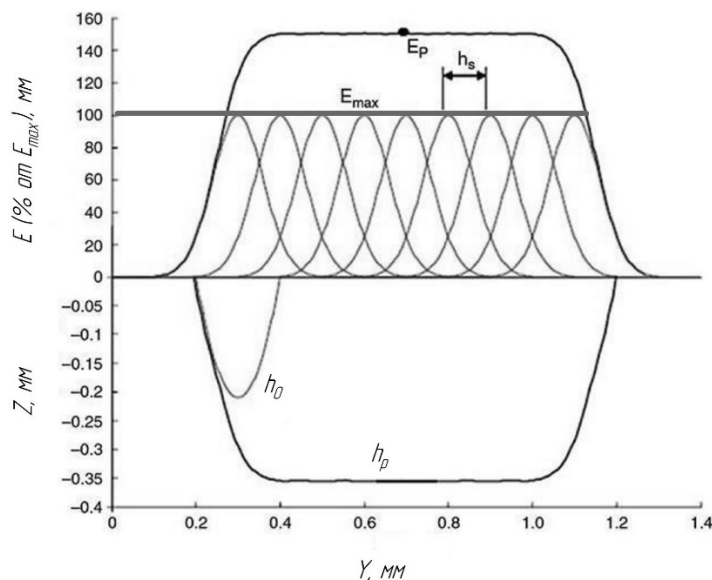


Рис. 3.14. Схема стратегии ACES™

В связи с перекрытием пятна лазера соседними проходами суммарное значение дозы облучения  $E_p$  растет по отношению к величине максимальной дозы облучения для одиночного прохода  $E_{max}$  и может быть определено по формуле [18]

$$E_p = E_{max} \left( 1 + \sum_{i=1}^4 \exp\left(\frac{-2ih_s}{w_0}\right) \right).$$

Из уравнения (3.1) следует, что толщина отверждаемого слоя может быть вычислена из выражения

$$h_p = h_0 + D_p \ln\left(\frac{E_p}{E_{max}}\right),$$

где  $h_0$  – толщина одиночного отвержденного трека.

Как и в стратегии STAR-WEAVE™, в ACES™ используется чередование последовательности, при котором треки в соседних слоях формируются во взаимно перпендикулярных направлениях.

Стратегия QuickCast™ разработана для формирования изделий, использующихся в качестве выжигаемых (газифицируемых) моделей для литья. Поскольку такие модели должны обладать минимальной газотворной способностью и образовывать минимальное количество негазифицируемого остатка, при их изготовлении необходимо создавать квазиполые структуры (рис. 3.15). Кроме того, модели в виде

решетки с большим шагом, фиксирующей внешнюю оболочку, обладают низкими внутренними напряжениями и минимальными искажениями и способны противостоять значительным деформациям, возникающим в результате их нагрева в процессе литья.



Рис. 3.15. Изделие с квазиполой структурой

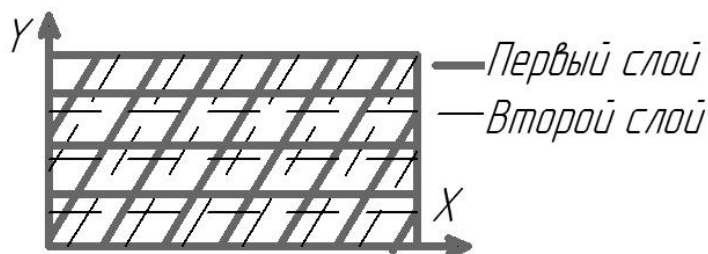


Рис. 3.16. Схема стратегии QuickCast V1.1

Разработаны различные версии стратегии QuickCast™, обеспечивающие создание квазиполых структур. QuickCast V1.1 [29, 35] основан на стратегиях трехлинейной решетки и WEAVE™ и отличается от последних бóльшим шагом между треками и смещением линий в различных слоях (рис. 3.16).

В стратегии QuickCast V2.0 создается гексагональная квазиполой структура (рис. 3.17) за счет того, что в каждом слое спекаются параллельные отрезки, совпадающие со сторонами правильного шестиугольника.

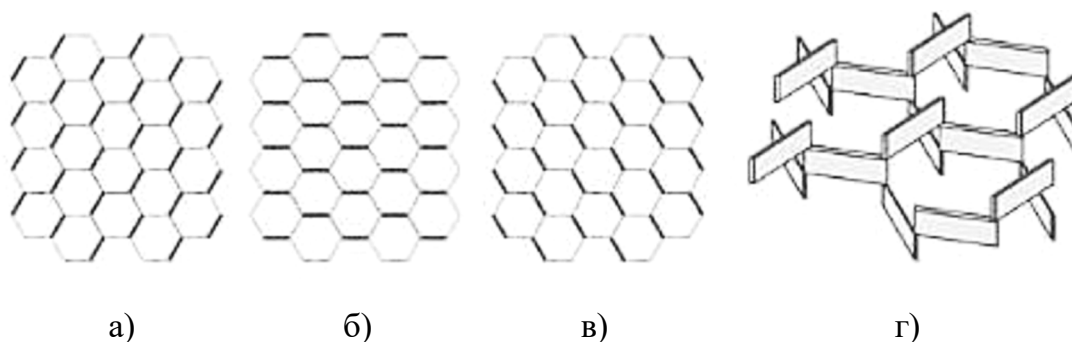


Рис. 3.17. Схема стратегии QuickCast V2.0: а – первый слой; б – второй слой; в – третий слой; г – аксонометрия трех слоев структуры

### ***3.1.8. Нанесение фотополимеризующейся композиции***

Нанесение фотополимера в стереолитографии предполагает погружение ранее сформированных слоев и выравнивание поверхности фотополимера специальным лезвием. При этом необходимо решить проблемы обеспечения производительности (нанесение должно выполняться максимально быстро) и качества (толщина слоя фотополимера над отвержденными слоями должна быть равномерной).

Погружение платформы построения перед началом формирования следующего слоя выполняется с задержкой, необходимой для достаточно полного отверждения предыдущего слоя. После погружения на поверхности фотополимера остаются неровности, поскольку вязкость фотополимера сравнительно высока. Лезвие устраняет неровности, двигаясь по поверхности фотополимера с довольно низкой скоростью. В связи с вышеуказанным процедура нанесения фотополимера требует больших затрат времени, которые могут составлять до 90 % от общей трудоемкости формирования изделия [39]. Кроме того, в процессе нанесения лазер не отключают, что приводит к непроизводительному расходованию его ресурса.

Процесс нанесения фотополимера должен осуществляться с высокой точностью, поскольку оказывает непосредственное влияние на качество получаемых изделий, так как отклонения от требуемой толщины слоя и его равномерности непосредственно переносятся на изделие. Особые проблемы могут возникнуть в случае появления изолированных объемов фотополимера, отделенных от остального объема фотополимера полостями ранее сформированных слоев. Вследствие усадки уровень фотополимера в такой полости может отличаться от окружающего. При нанесении фотополимера над изделием толщина слоя будет зависеть от эффекта смачивания и может получиться неравномерной. Подобные проблемы вызывают погрешности изделия и могут привести к столкновению лезвия с отвержденным слоем или к расслоению изделия. Погрешности нивелируются при увеличении толщины слоя фотополимера, однако тем самым снижается точность воспроизведения формы изделия. В целом ошибки нанесения фотополимера разделяют на две группы [40] (рис. 3.18).

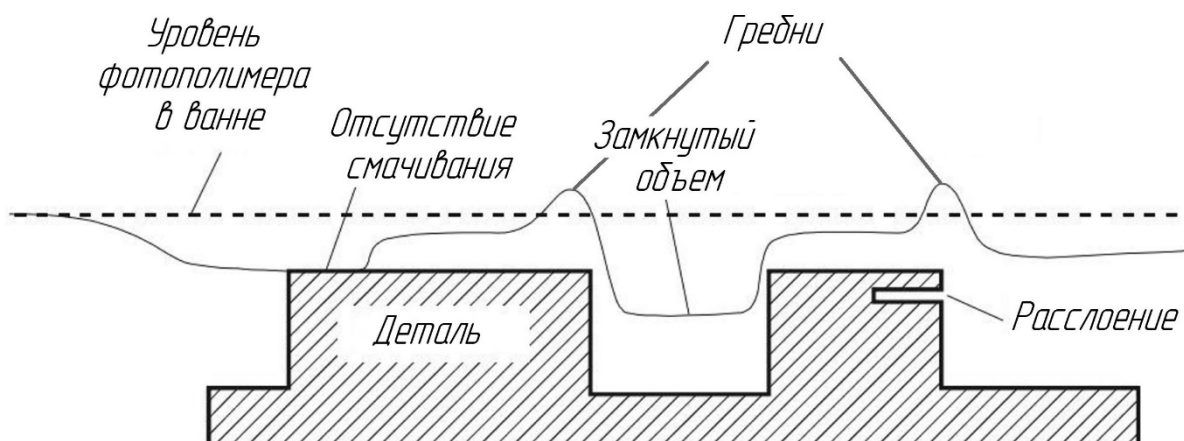


Рис. 3.18. Основные виды ошибок нанесения слоя фотополимера

Ошибки отдельного слоя: нарушение толщины слоя; отсутствие смачивания; возникновение гребней.

Ошибки совокупности слоев: погрешность высоты; погрешность замкнутых объемов; расслоения.

Традиционно для решения проблем обеспечения равномерности слоев используют способ глубокого погружения («deep dip»), при котором сформированная часть изделия с запасом погружается в фотополимер, а потом поднимается на высоту, обеспечивающую требуемую толщину слоя. При таком способе цикл нанесения слоя фотополимера состоит из нескольких этапов [41].

1. Контроль и регулировка уровня (рис. 3.19). После формирования предыдущего слоя посредством лазерного датчика контролируется уровень фотополимера в ванне (емкости) установки, поскольку он может изменяться вследствие усадки. В случае если он выходит за допустимые пределы, то используется система регулировки уровня. При этом задействуется специальный плунжер, который, погружаясь в емкость, вытесняет объемы фотополимера. Требуемый уровень фотополимера поддерживается с целью обеспечения должной фокусировки луча лазера на поверхности фотополимера.

2. Погружение и подъем на толщину слоя (рис. 3.20). Платформа погружается в фотополимер таким образом, чтобы сформированная часть изделия гарантированно оказалась под поверхностью фотополимера с целью обеспечения смачивания протяженных участков сформированных поверхностей. Далее платформа построения поднимается так, чтобы верх сформированной части изделия оказался ниже лезвия на расстоянии, равном толщине одного слоя.



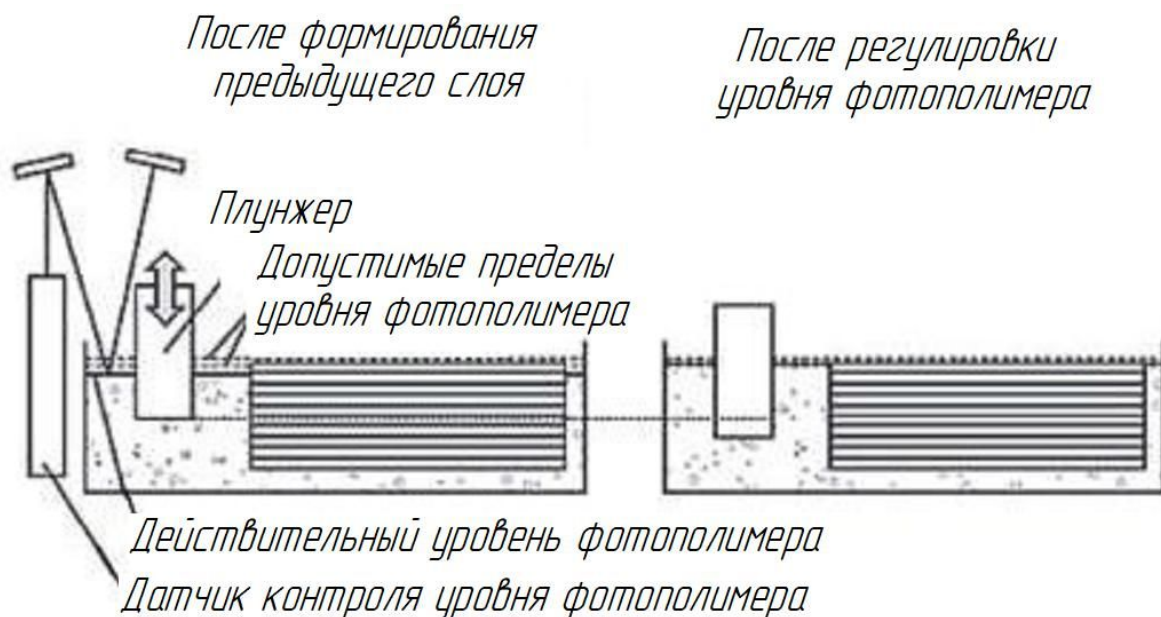


Рис. 3.19. Схема контроля и регулировки уровня фотополимера

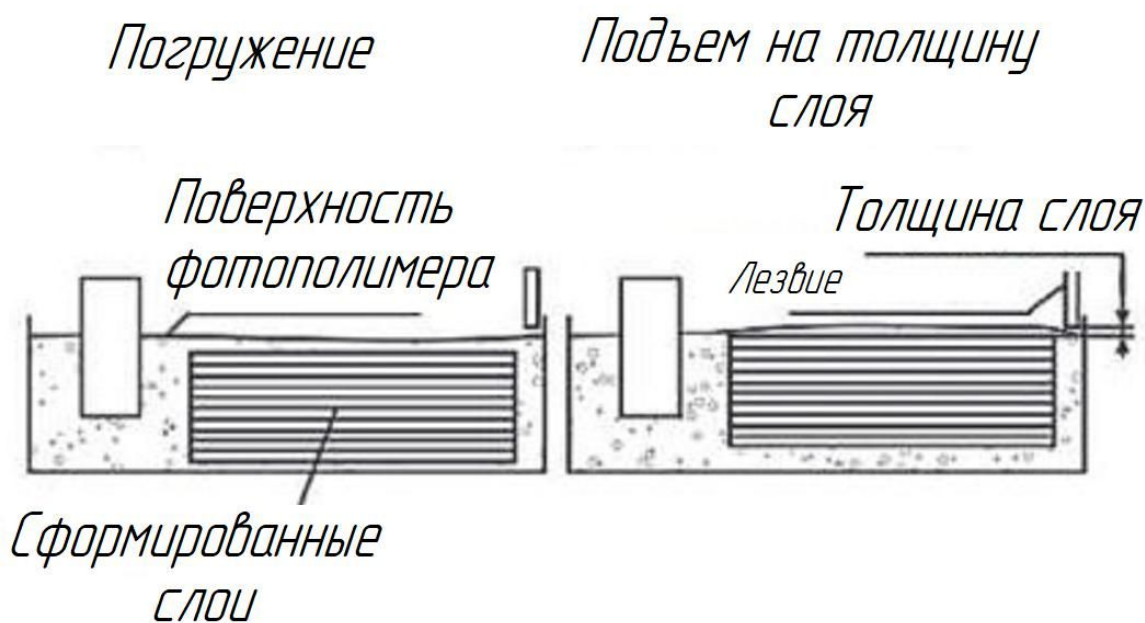


Рис. 3.20. Схема погружения и подъема на толщину слоя

3. Разравнивание. Лезвие проходит над поверхностью фотополимера, удаляя его излишки с поверхности сформированной части изделия. При этом может варьироваться как число (от 1 до 7), так и период ходов (от 3 до 30 с) в зависимости от конфигурации изделия, в том числе от наличия замкнутых объемов.

4. Установка в рабочее положение и выдержка. Платформа построения опускается так, чтобы поверхность нанесенного слоя фотополимера находилась на одном уровне с поверхностью фотополимера в ванне (емкости). Вследствие эффекта поверхностного натяжения по периметру изделия возникают искажения поверхности фотополимера. Для их релаксации используют выдержку порядка 15 – 30 с.

5. После этого поверхность фотополимера готова к отверждению следующего слоя изделия.

Более высокой точности и производительности нанесения слоев удается достичь применением лезвий специальных конструкций. В отличие от обычных лезвий в вице-планки, называемых пассивными, активные лезвия представляют собой узел, способный добавлять фотополимер или удалять его излишки.

Примером активного лезвия является система Zephyr™, предложенная в 1996 г. компанией «3D Systems Corp.» и активно используемая в установках стереолитографии Zephyr™. Она позволяет [42] обойтись без глубокого погружения и подъема на толщину слоя, поскольку представляет собой вакуумную систему, которая захватывает фотополимер из ванны (емкости) и наносит его тонким слоем на поверхность сформированной части изделия.

В ряде установок реализованы системы нанесения фотополимера, вообще не использующие погружение в емкость. В таких системах фотополимер может наноситься на поверхность распылением через сопла. Примерами таких установок можно назвать STEREOS MAX 600 (EOS GmbH) и установки печати с фотохимическим отверждением.

В ряде установок компании «EnvisionTEC GmbH» реализована оригинальная схема построения модели «сверху-вниз», при которой отпадает необходимость в системе нанесения фотополимера (рис. 3.21). Изделие формируется на нижней части платформы построения путем засветки фотополимера внизу ванны (емкости) DLP-проектором. При переходе на следующий слой платформа построения поднимается вверх.



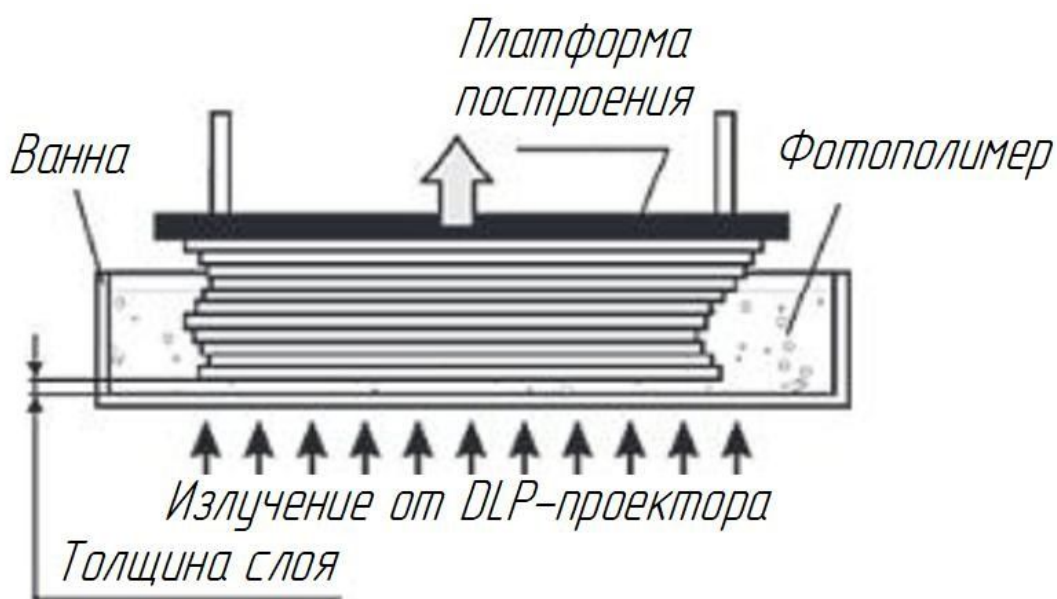


Рис. 3.21. Схема построения модели «сверху-вниз» в установках компании «EnvisionTEC GmbH»

### 3.2. Методы слияния порошковых оснований

Данные методы характеризуются наличием одного или более источников тепла, обеспечивающих спекание частиц порошка при формировании каждого отдельного слоя модели. В качестве исходного материала могут использоваться полимерные, металлические и керамические порошки. В англоязычных источниках такие методы объединяют под названием Powder Bed Fusion (PBF), или слияние порошковых оснований (СПО) [18], или Powder-based System (PBS) – системы на основе порошкового строительного материала.

Различные методы СПО классифицируют по характеру и природе источника тепла, способу нанесения порошка и схеме формирования слоя (рис. 3.22) [43]. Известность получили такие методы СПО, как селективное лазерное спекание, электронно-пучковое плавление (Electron Beam Melting), селективное лазерное плавление (Selective Laser Melting), селективное спекание через маску (Selective Mask Sintering) и ряд других.

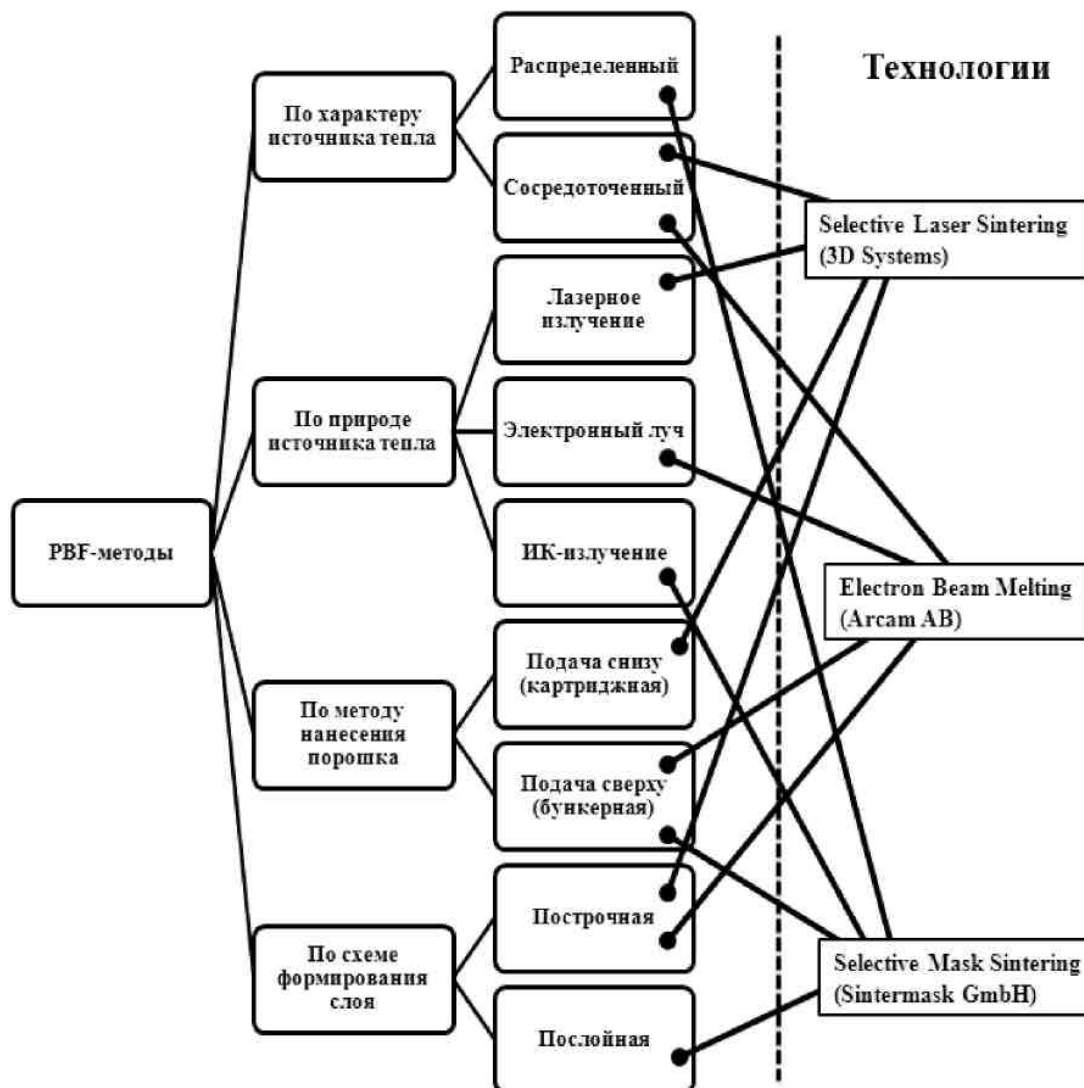


Рис. 3.22. Классификация методов СПО

### 3.2.1. Механизмы слияния частиц порошков

Сущность всех разновидностей послойного синтеза слиянием порошковых оснований заключается в формировании твердого тела из разрозненных частиц порошка путем их слияния при воздействии температуры. Выделяют четыре механизма слияния частиц порошков [18, 44].

#### *Твердофазное спекание*

Твердофазным называют спекание, протекающее без образования жидкой фазы. Осуществляется, как правило, при температурах 50 – 100 % от температуры плавления вещества порошка.

При нагреве порошкового тела в нем происходят изменения, в соответствии с которыми выделяют шесть стадий твердофазного спекания (ТФС) [45] (рис. 3.23).

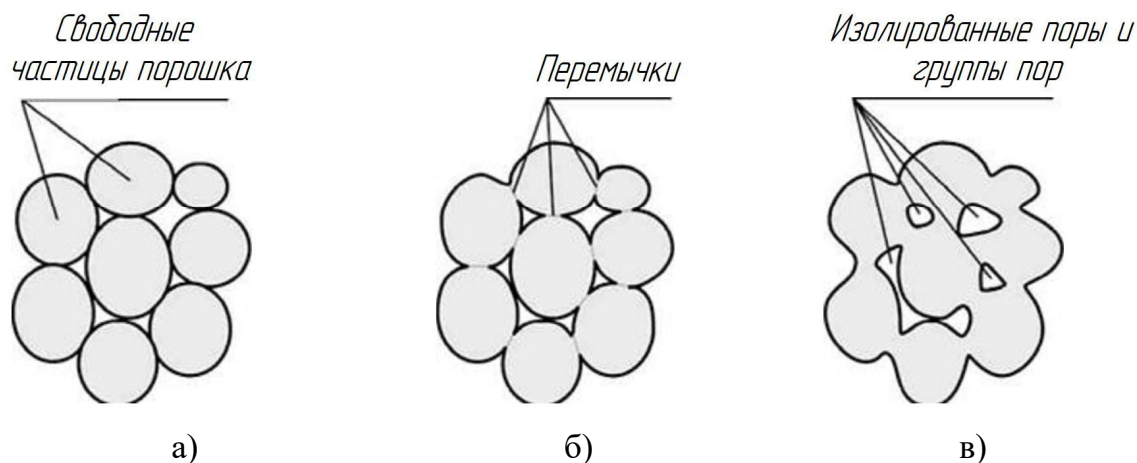


Рис. 3.23. Некоторые стадии твердофазного спекания: а – порошковое тело до спекания; б – развитие связей между частицами порошка и рост перемычек; в – закрытие сквозной пористости

**Развитие связей** между частицами изначально свободного порошка. Данный процесс имеет диффузионный характер и ведет к образованию и развитию межчастичных границ. В результате возникают перемычки («шейки») между частицами порошка.

**Рост перемычек контакта.** Происходит в результате переноса вещества в область межчастичного контакта. Выделяют следующие механизмы массопереноса в нагреваемом порошковом теле: перенос через газовую фазу, поверхностная и объемная диффузия, вязкое течение, течение под воздействием внешних нагрузок [45]. Порошковое тело становится более прочным и структурно представляет собой беспорядочно перемежающиеся фазы твердого вещества и газа. На этой стадии процесс спекания может быть прекращен. Полученное тело будет иметь открытую пористость.

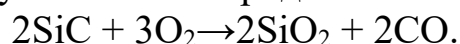
**Закрытие сквозной пористости.** В результате дальнейшего увеличения перемычек образуются изолированные поры и группы пор. Суммарный объем пор уменьшается, и происходит усадка порошка.

**Сфероидизация пор.** В результате дальнейшего переноса вещества в область межчастичного контакта поры и группы пор округляются, приобретая сферичность.

На практике чаще всего процесс ТФС останавливают на стадиях закрытия сквозной пористости или сфероидизации пор. Формируемые таким образом изделия неизбежно обладают высокой пористостью.

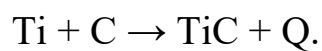
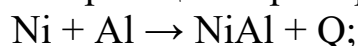
### *Химически инициируемое спекание*

Химически инициируемое спекание реализуется за счет запуска под воздействием температуры управляемых реакций между компонентами порошковой смеси и/или атмосферой [18]. Примером является реакция окисления карбида кремния при нагреве порошка SiC в присутствии кислорода



В результате образуется композиционное тело, состоящее из карбидов и оксидов кремния.

Особым видом химически инициируемого спекания следует назвать процессы, совмещающие лазерное спекание с самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (СВС) [Там же]. В этом случае в порошковой смеси реализуется управляемая экзотермическая реакция. Примеры таких реакций:



Данным способом можно получать тугоплавкие изделия из керамики и интерметаллидов. Сформированные по данному механизму слияния изделия имеют высокую пористость, что вызывает необходимость трудоемкой постобработки или поиска особых сфер применения изделий, например, использование их в качестве фильтрующих элементов.

### *Жидкофазное спекание*

Жидкофазным называют спекание порошкового тела при температуре, обеспечивающей появление жидкой фазы. Жидкофазное спекание (ЖФС) является доминирующим механизмом слияния в современных методах СПО [18], поскольку позволяет получать изделия с малой остаточной пористостью.

Процесс ЖФС включает в себя следующие стадии [44, 45].

**Процесс перегруппировки** (механическая перегруппировка). Появившаяся в результате нагрева жидкая фаза заполняет пространство между твердыми частицами и, подобно жидкой смазке, облегчает взаимное перемещение частиц, сопровождающееся сокращением свободной поверхности жидкости. В результате порошковое тело

уплотняется. Основную роль при этом играют капиллярные силы, которые при равномерном распределении жидкой фазы в порошковом теле по своему действию эквивалентны всестороннему сжатию. Полное уплотнение порошкового тела за счет перегруппировки может быть достигнуто при объемном содержании жидкой фазы (35 – 50 %).

**Растворение-осаждение.** Данная стадия является существенной в системах, в которых твердая фаза имеет растворимость в жидкой и количество жидкой фазы составляет не менее 5 % (объемная доля). При ее протекании мелкие частицы твердой фазы растворяются в жидкой, а крупные увеличиваются в размерах, приобретая округлую форму. Транспорт материала осуществляется за счет диффузии через жидкую фазу. Эта стадия также сопровождается уплотнением порошкового тела.

**Твердофазное спекание.** На данной стадии существенно возрастает количество частиц, не разделенных жидкой фазой. Такие частицы взаимно припекаются, образуя жесткий каркас в порошковом теле. Жидкая фаза на этом этапе может исчезнуть – закристаллизоваться или раствориться в тугоплавкой фазе. Кинетика спекания на данной стадии аналогична закономерностям твердофазного спекания.

Для реализации ЖФС в порошковом теле должны присутствовать компоненты, способствующие появлению при нагреве жидкой фазы (связующее), и структурные элементы, обеспечивающие требуемые свойства изделия (матрица). Для этого в процессах СПО возможно использование четырех видов порошков и их смесей [44].

**Смесь отдельных частиц связующего и матрицы.** Представляет собой механическую смесь не скрепленных между собой частиц двух или более компонентов, одна часть из которых выступает как матрица, а другая – как связующее. В качестве матрицы используются металлические или керамические порошки, в качестве связующего, как правило, – металлические порошки. Используются более мелкие частицы порошка связующего в сравнении с частицами матрицы с целью интенсификации капиллярных сил, обеспечивающих уплотнение порошкового тела. Примером такой смеси типа металл – металл является смесь порошкового железа или стали (матрица) и меди (связующее). В качестве смесей керамика – металл используют смеси с матрицей из карбидов и боридов: WC-Cu, WC-Co, TiC-Ni/Co/Mo, ZrB<sub>2</sub>-Cu, TiB<sub>2</sub>-Ni. Также могут использоваться металлполимерные порошковые композиции (матрица – металл, связующее – полимер): латунь – поликарбонат, никель – полиамид, никель – полиметакрилат и т. п. [11, 46].

На практике данным способом весьма сложно получить изделия с низкой пористостью (рис. 3.24, 3.25, а), в связи с чем формируют полуфабрикат («зеленую деталь»), который в дальнейшем подвергают горячему изостатическому прессованию (ГИП) или производят инфильтрацию легкоплавким металлом (рис. 3.25, б).

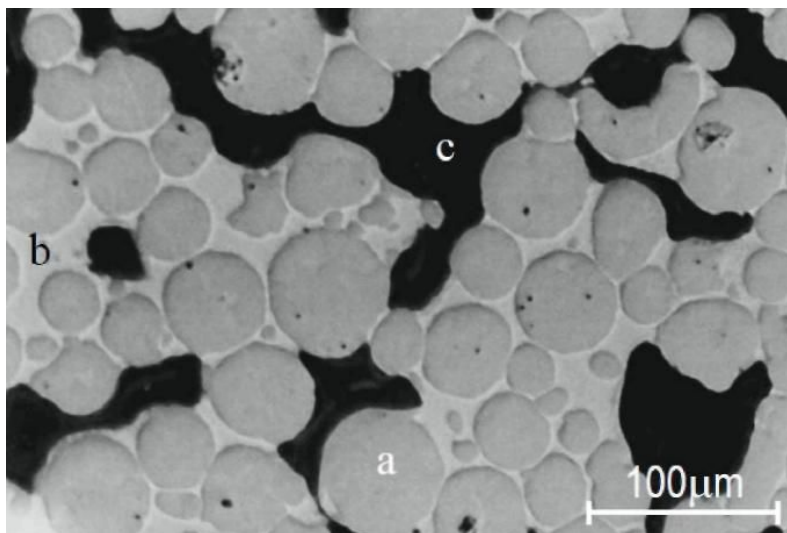


Рис. 3.24. Фотография структуры тела, полученного жидкофазным спеканием смеси нержавеющая сталь – медь (а – частицы матрицы; б – связующее; с – поры)

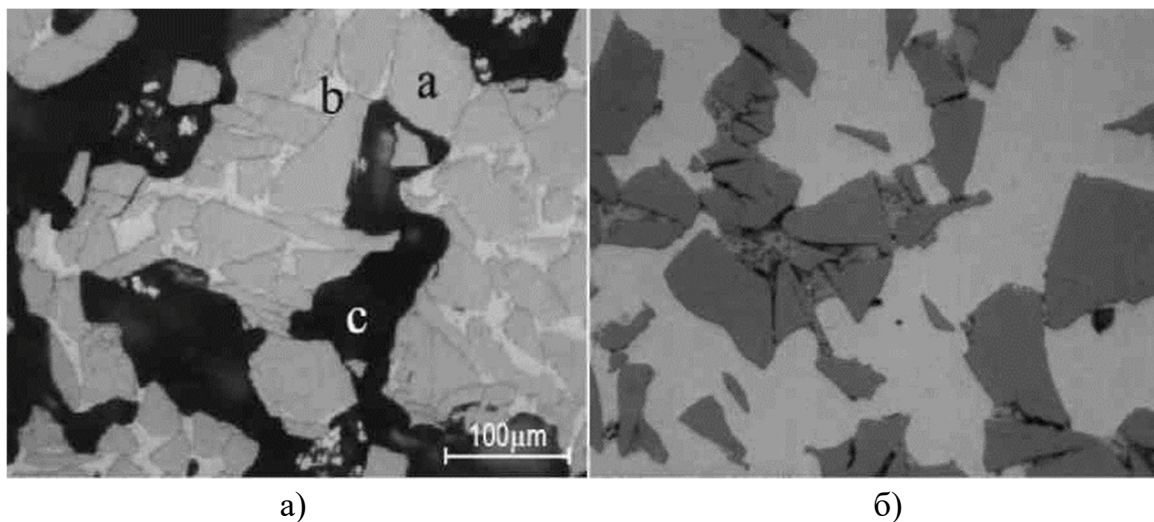


Рис. 3.25. Фотография структуры тела из смеси WC-Co: а – после ЖФС; б – после инфильтрации медью (а – частицы матрицы; б – связующее; с – поры)

**Порошки с композитными частицами.** В таких порошках каждая частица содержит как материал матрицы, так и связующего. Наиболее распространенным способом получения данных порошков является механическое легирование, заключающееся в смешивании порошков связующего и матрицы и их дальнейшем перемешивании в высокоэнергетических шаровых мельницах. В процессе механического легирования частицы порошка слипаются между собой и растрескиваются, в результате образуется гомогенный порошок, частицы которого содержат как материал матрицы, так и материал связующего. Использование порошков с композитными частицами позволяет получать меньшую пористость и более высокое качество поверхности формируемых изделий в сравнении с изделиями, получаемыми из смеси отдельных частиц связующего и матрицы.

Порошки с композитными частицами могут состоять из тугоплавкой металлической или керамической матрицы и более легкоплавкого металлического связующего. Также используются порошки с полимерным связующим и матрицей из полимера с более высокой температурой плавления, металлов, керамики и т. п.

**Порошки с покрытыми частицами.** В таких порошках частицы матрицы покрыты веществом связующего, что обеспечивает поглощение излучения именно тем материалом, который необходимо нагревать, – связующим. Кроме того, в таких порошках наблюдается лучшее скрепление частиц. Используются порошки как с металлическим (например, сталь – медь), так и полимерным связующим (например, сталь – полиамид). Последние получили большее распространение: компания «3D Systems Corp.» поставляет порошки из стали, покрытой полимером, под торговой маркой «LaserForm»; компания «EOS GmbH» поставляет подобные порошки под торговой маркой «DirectSteel». Технология получения изделий из керамических порошков, покрытых полимером, компании «EOS GmbH» получила название «Direct Croning Process» (DCP).

**Порошки с нечетким разделением матрицы и связующего.** В полимерных порошках вследствие их низкой теплопроводности при тепловом воздействии на них может возникнуть ситуация, при которой мелкие частицы порошка перейдут в жидкую фазу и будут выступать в роли связующего, а более крупные частицы останутся в

твердой фазе и будут выступать в качестве матрицы. Для такого вида слияния вместо термина «жидкофазное спекание» в некоторых работах используется термин «частичное плавление» («partial melting»). Кроме того, аморфные полимеры не имеют четкой температуры плавления, что также может приводить к частичному плавлению частиц порошка. В гомогенных металлических порошках также возможна реализация жидкофазного спекания. Частичное появление жидкой фазы при этом связано с инерционностью процесса плавления и неоднородностью материала частиц порошка.

### *Полное плавление*

Данный вид слияния применяется для изготовления металлических изделий и изделий из полимеров [18]. Суть его заключается в том, что под тепловым воздействием локальный объем порошкового тела переходит в жидкую фазу, которая после застывания образует единицу объема формируемого изделия. При перемещении источника тепла в жидкую фазу переходит следующий объем порошкового тела, при этом частично расплавляется и ранее образованный из затвердевшего расплава участок. Таким образом получают функциональные изделия с высокой плотностью и хорошими механическими свойствами. В качестве материалов порошка используются полукристаллические полимеры с определенной температурой плавления, такие как полиамид, а также различные металлические материалы: нержавеющая сталь, титановые, кобальт-хромовые, никель-хромовые и другие сплавы [11, 18, 44].

### *3.2.2. Селективное лазерное спекание*

Первым коммерчески успешным методом СПО был метод, названный Selective Laser Sintering (SLS) – селективное лазерное спекание (СЛС).

Метод во многом схож со стереолитографией, однако в качестве исходного материала используются порошки. Типичная схема СЛС-установки приведена на рис. 3.26.



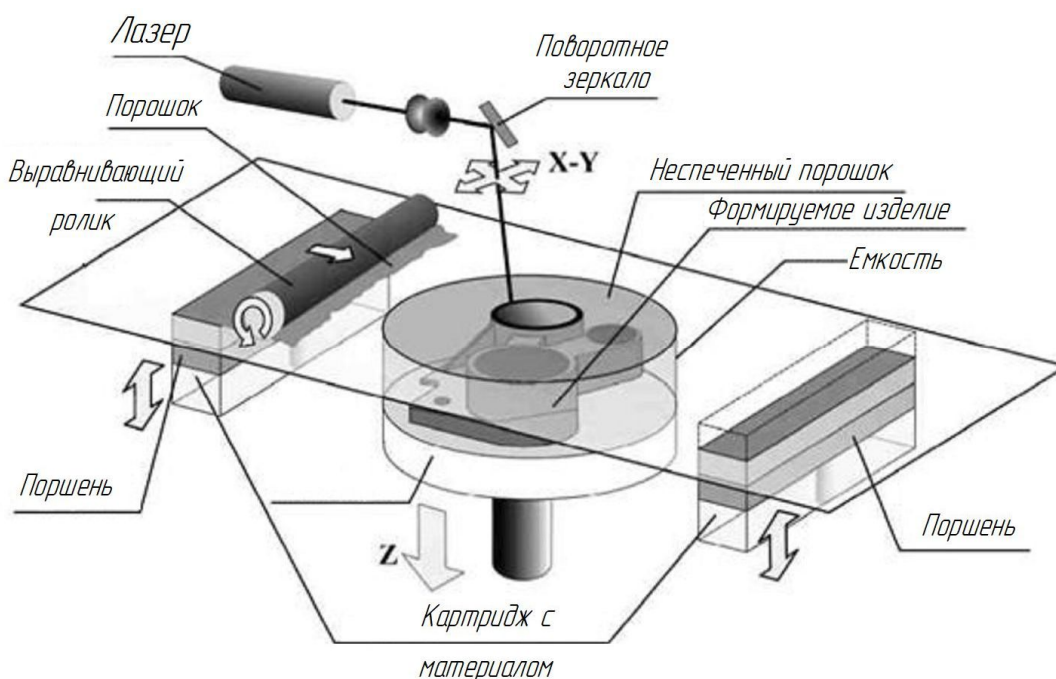


Рис. 3.26. Типичная схема СЛС-установки (по материалам [18; 27])

Изделие формируется в емкости на подвижной платформе построения. Строительный материал (порошок) хранится в картриджах, с перемещением поршней которых порошок подается на стол установки. При создании первого слоя платформа перемещается в положение, при котором расстояние от края емкости до платформы равно толщине слоя. Выравнивающий ролик наносит на платформу слой порошка. После чего луч лазера, проходя по заданной траектории, спекает участки порошка (образует треки), формируя единичный слой изделия. Для формирования следующего слоя платформа опускается и указанные действия повторяются. Для данного процесса не требуется создания поддерживающих структур, поскольку их роль выполняет неспеченный порошок. Перед спеканием порошковый материал может подогреваться посредством ИК-излучения. Процесс обычно реализуется в защитной среде.

Установки, работающие по данной схеме, могут реализовывать любой из четырех механизмов слияния частиц порошка в зависимости от режимов работы и состава порошкового тела. При слиянии порошковых оснований по методу полного плавления вместо селективного лазерного спекания используют термин «селективное лазерное плавление» (СЛП) – Selective Laser Melting (SLM).

### 3.2.3. Электронно-пучковое плавление

Способ электронно-пучкового плавления (ЭПП) – Electron Beam Melting (EBM) – был разработан в 1997 г. в Чалмерском технологическом университете (Chalmers University of Technology, Швеция) и коммерциализован компанией «Arcam AB» (Швеция). В способе ЭПП слияние частиц порошка происходит по механизму полного плавления при построчной схеме формирования. Источником энергетического воздействия на порошковое тело выступает электронный пучок. При торможении ускоренных электронов вблизи поверхности металлического тела их кинетическая энергия преобразуется в тепловую, в результате чего на поверхности порошка возникает локальный источник тепла. Схема установки ЭПП (рис. 3.27) в целом аналогична СЛС, за исключением источника воздействия и системы сканирования слоя.

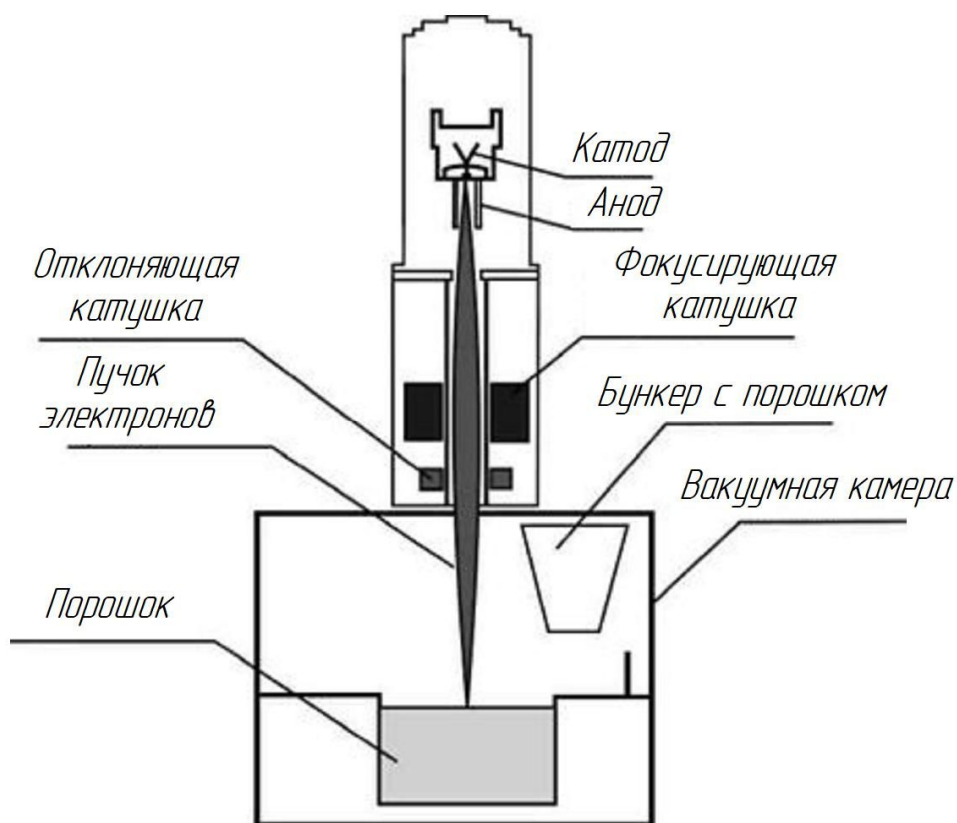


Рис. 3.27. Схема установки электронно-пучкового плавления [18]

Процесс реализуется в техническом вакууме. Для удаления побочных газообразных продуктов процесса через камеру прокачивают небольшое количество инертного газа. Сканирование слоя осуществляется отклонением пучка электромагнитным полем без использова-

ния механических систем, что обуславливает отсутствие вызванных инерцией ограничений к скорости сканирования и обеспечивает ее высокие значения. Сравнительные характеристики электронно-пучкового плавления и селективного лазерного плавления приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Сравнение качественных характеристик способов электронно-пучкового плавления и селективного лазерного плавления

| Характеристика             | ЭПП                      | СЛП                                       |
|----------------------------|--------------------------|---|
| Источник тепла             | Электронный пучок        | Лазерное излучение                        |
| Среда                      | Технический вакуум       | Инертный газ                              |
| Система сканирования слоя  | Безынерционная (катушки) | Инерционная (сканаторы)                   |
| Скорость сканирования      | Высокая                  | Ограниченная                              |
| Предварительный подогрев   | Электронным пучком       | Инфракрасным или резистивным нагревателем |
| Энергозатраты              | Средние                  | Высокие                                   |
| Качество поверхности       | От среднего до грубого   | От среднего до высокого                   |
| Разрешение                 | Среднее                  | Высокое                                   |
| Материалы порошкового тела | Металлы (проводники)     | Полимеры, металлы, керамика               |
| Структура изделия          | Однородная               | Содержит следы отдельных треков           |

В силу специфики механизма воздействия в качестве строительного материала изделий могут выступать лишь металлы и сплавы (проводники). Причем проводимость порошкового тела должна быть достаточно высокой, поскольку при низкой проводимости частицы порошкового тела будут накапливать отрицательный заряд, что приведет к негативным эффектам: выталкивание частиц порошка из порошкового тела вследствие сил электростатического отталкивания между частицами; рассеяние электронного пучка. Для снижения накопления заряда локальными областями порошкового тела ис-

пользуют особые стратегии сканирования слоя. С той же целью ограничивают и локализацию пятна электронного пучка на поверхности порошка, что приводит к увеличению зоны нагрева, в связи с чем точность ЭПП и качество поверхности в сравнении с селективным лазерным плавлением несколько ниже.

За счет равномерного предварительного подогрева подложки и наносимого слоя в ЭПП реализуются меньшие скорости охлаждения расплава порошкового тела, что приводит к более низкой пористости, более однородной структуре изделия и отличиям в микроструктуре в сравнении с СЛП. В структуре изделий, полученных ЭПП, практически невозможно выделить следы отдельных треков. Энергоэффективность электронно-пучкового плавления в сравнении с селективным лазерным плавлением значительно выше, что объясняется более высоким коэффициентом поглощения энергии.

Основные сферы применения ЭПП в настоящее время – аэрокосмическая отрасль (рис. 3.28, а), производство медицинских имплантатов (рис. 3.28, б). Наиболее распространенные материалы изделий – титановые и жаропрочные сплавы. Компания «Arcam AB» рекомендует использовать ЭПП для изделий со сложной геометрией, выпускаемых в единичных экземплярах, изготавливаемых из дорогостоящих материалов, тяжело подвергающихся традиционным способам обработки.



Рис. 3.28. Изделия, изготовленные электронно-пучковым плавлением: а – изделие аэрокосмической отрасли; б – индивидуальный имплантат

### 3.2.4. Селективное спекание с послойной схемой формирования

В способах селективного спекания с послойной схемой формирования – Layer-wise Powder Bed Fusion (LwPBF) – вместо сосредоточенных источников тепла (лазерное излучение, электронный пучок) используются распределенные источники, чаще всего – инфракрасные лампы или резистивные нагреватели. Слой формируется одновременно в течение однократного воздействия источника тепла. Геометрия слоя может задаваться одним из трех способов [18], приведенных ниже.

**Проецирование излучения через маску.** Способ основан на создании экспозиции инфракрасного излучения посредством маски, повторяющей форму спекаемого слоя. Такой способ реализован в технологии Selective Mask Sintering (SMS), разработанной компанией «Sintermask GmbH» (Германия). Схема процесса приведена на рис. 3.29.

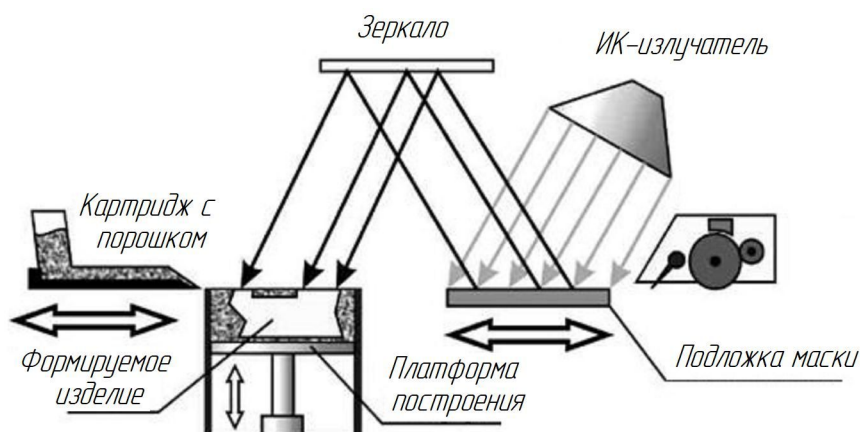


Рис. 3.29. Схема процесса Selective Mask Sintering

Способ формирования масок аналогичен тому, который используется в технологии Solid Ground Curing. Слой порошка спекается примерно за одну секунду, на нанесение слоя затрачивается около трех секунд.

Для реализации SMS материал порошка должен обладать достаточно высоким поглощением ИК-излучения, в связи с чем используются темные порошки. В качестве возможных материалов порошка компания «Sintermask GmbH» предлагает различные полимеры: полиамид, полиэтилен, полистирол, полипропилен, поликарбонат, а также

покрытые полимерами металлические и керамические порошки и такие материалы, как сахар и воск.

**Нанесение на порошковое тело агентов, увеличивающих поглощение излучения.** В данном способе на поверхность слоя порошка посредством печатающей головки наносят слой материала-абсорбента, повторяющего требуемую геометрию слоя. Материал-абсорбент обеспечивает поглощение ИК-излучения в степени, достаточной для возникновения температуры, при которой реализуется спекание порошка. В качестве примера реализации такого способа известен метод высокоскоростного спекания (ВСС) – High Speed Sintering (HSS), разработанный под руководством Н. Хопкинсона (N. Hopkinson) в университете Лафборо (Loughborough University, Великобритания). Схема высокоскоростного спекания приведена на рис. 3.30. Наносящий порошок ролик, печатающая головка и инфракрасная лампа смонтированы на едином подвижном узле. При рабочем ходе узла слева направо ролик наносит слой порошка (рис. 3.30, б). При обратном ходе (рис. 3.30, в) печатающая головка наносит абсорбент на поверхность порошкового тела. Одновременно с этим включается ИК-лампа, под тепловым излучением которой участки порошкового тела с нанесенным абсорбентом спекаются, образуя единичный слой.

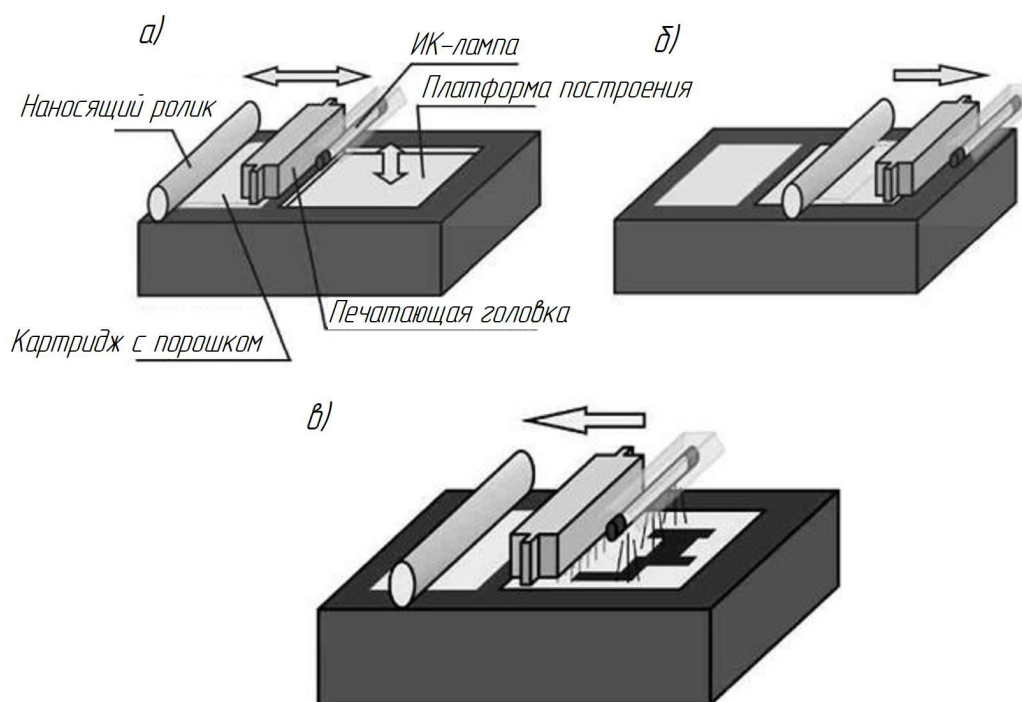


Рис. 3.30. Схема способа высокоскоростного спекания [23, 47]: а – схема установки; б – нанесение слоя порошка; в – нанесение абсорбента и спекание

Высокоскоростное спекание считается очень перспективным способом аддитивной технологии, поскольку обеспечивает высокую производительность. В этом отношении HSS может конкурировать с литьем пластмасс под давлением. Высокоскоростное спекание позволяет достигнуть точности до 0,05 мм; кроме того, исследования показывают, что данный способ обеспечивает более высокие механические свойства изделий в сравнении с полимерными изделиями, полученными селективным лазерным спеканием за счет большей однородности материала, обеспечиваемой послойной схемой формирования изделий.

**Нанесение на порошковое тело ингибиторов спекания.** Данный способ является своего рода антиподом предыдущего. На поверхность порошкового тела наносится ингибитор спекания, препятствующий образованию твердого тела из порошка на обработанных участках.

Примером такого способа является способ селективного ингибирования спекания (СИС) – Selective Inhibition of Sintering (SIS), разработанный Б. Хошневис (B. Khoshnevis) в университете Южной Калифорнии, США (University of Southern California). Схема установки селективного ингибирования спекания приведена на рис. 3.31, а.

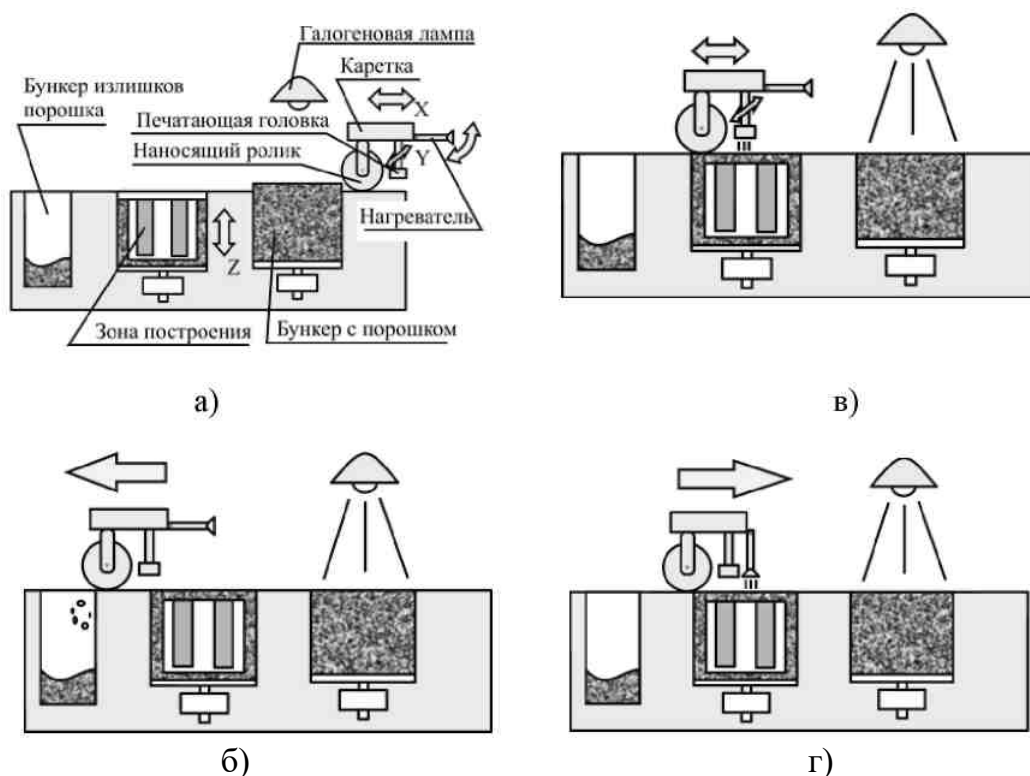


Рис. 3.31. Схема процесса селективного ингибирования спекания: а – схема установки; б – нанесение слоя порошка; в – нанесение ингибитора спекания; г – процесс спекания

Порошок подается из специального бункера, подогреваемого галогеновой лампой. Зона построения подогревается резистивным нагревателем. Центральным узлом установки служит подвижная каретка, на которой смонтированы ролик, наносящий порошок, печатающая ингибитором спекания головка, способная перемещаться в поперечном направлении, и нагреватель (нить накаливания или газоразрядная лампа).

Цикл формирования одного слоя в СИС состоит из трех этапов:

- 1) нанесение слоя порошка посредством ролика (рис. 3.31, б);
- 2) нанесение ингибитора спекания по контуру спекаемого слоя (рис. 3.31, в);
- 3) спекание участков слоя порошкового тела, не содержащих ингибиторы спекания (рис. 3.31, г).

В качестве ингибиторов спекания могут использоваться водные растворы солей, органические растворители, спирты, пероксид водорода и другие вещества и смеси. Материал изделий – полимерные порошки.

Возможно получение металлических изделий [48]. При этом на установке СИС получают лишь полуфабрикат, состоящий из слоев порошка с нанесенным ингибитором спекания (водный раствор сульфата алюминия –  $Al_2(SO_4)_3$ ). Нагреватель на каретке установки осуществляет только сушку ингибитора, но не спекает собственно порошок. Полученное «зеленое» изделие в дальнейшем помещают в печь и производят спекание порошкового тела. Несмотря на потенциальные преимущества способа СИС (высокая производительность, низкие энергозатраты, простота конструкции установки), его коммерческая реализация на данный момент не осуществлена.

### ***3.2.5. Нанесение слоев порошкового материала***

При практической реализации способов СПО необходимо решить задачу нанесения слоев порошкового материала. При этом система подачи порошка должна быть реализована таким образом, чтобы обеспечивать:

- ✓ нанесение слоев порошкового материала минимальной и равномерной толщины с обеспечением гладкости открытой поверхности порошка;
- ✓ повторяемость характеристик слоев порошкового материала;



- ✓ достаточный запас порошкового материала, позволяющий получать крупногабаритные изделия;
- ✓ перенос количества порошкового материала, достаточного для перекрытия предыдущего слоя, при отсутствии излишков;
- ✓ отсутствие в процессе нанесения слоя нагрузок, способных вызвать смещение, деформацию или разрушение ранее сформированных слоев.

С точки зрения обеспечения высокой точности изделий и качества поверхности необходимо стремиться к использованию порошков с высокой дисперсностью, однако уменьшение размера частиц приводит к проблемам, связанным с особенностями порошковых материалов:

- ✓ с уменьшением размера частиц увеличивается трение между ними и происходит рост электростатических сил, что приводит к снижению текучести порошка;
- ✓ с уменьшением размера частиц увеличивается реакционная способность порошков, что может привести к их возгоранию или активному окислению, в связи с чем появляется необходимость создания защитной среды;
- ✓ частицы высокодисперсных порошков легко образуют взвеси в окружающей атмосфере («пылят»), в результате чего снижается эффективность передачи энергии от излучателя к поверхности порошкового тела, частицы оседают на узлах оборудования и элементах оптики, препятствуя их нормальному функционированию.

Существуют различные варианты нанесения слоев порошкового материала. В технологии селективного лазерного спекания используется способ с парой выталкивающих порошков картриджа и противовращающимся роликом (рис. 3.32).

Цикл нанесения состоит из следующих операций. Картридж выталкивает на поверхность порцию порошка (рис. 3.32, а). Далее ролик двигается поступательно вдоль рабочей поверхности установки, вращаясь встречно к направлению поступательного движения и перемещая «волну» порошка, наносит его на платформу (рис. 3.32, б).

Встречное вращение ролика препятствует заклиниванию порошка между ним и поверхностью, на которую наносится порошок (повышает текучесть), что способствует более равномерному его нанесению и уменьшает силу, действующую на порошковое тело и

способную вызвать смещение или деформацию ранее сформированных слоев изделия.

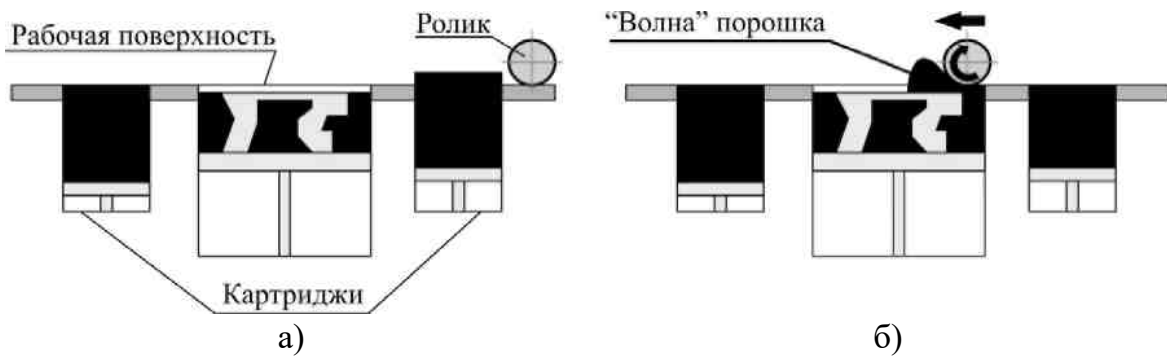


Рис. 3.32. Схема нанесения порошка парой выталкивающих картриджей и противовращающимся роликом: а – выталкивание порции порошка; б – нанесение порошка на платформу

При обратном ходе ролика порошок переносится из противоположного картриджа, а направление вращения ролика меняется на обратное.

Еще одним распространенным вариантом является бункерная схема, при которой порошок подается из бункера, перемещающегося совместно с роликом (рис. 3.33, а) либо с выравнивающим лезвием (рис. 3.33, б). Бункер одновременно выполняет функцию дозирования порошка и его нанесения на рабочую поверхность.

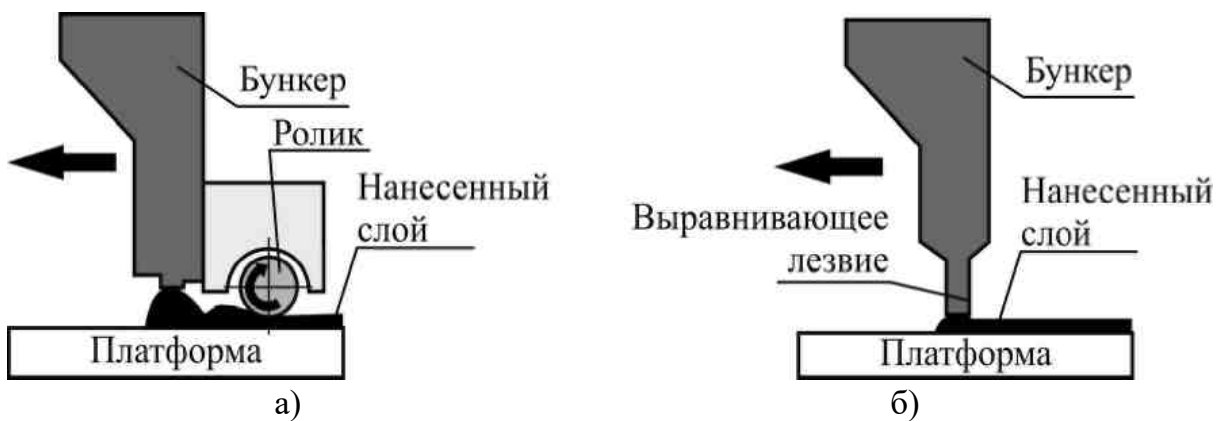


Рис. 3.33. Бункерная схема нанесения порошка: а – с выравнивающим роликом; б – с выравнивающим лезвием

В случае использования лезвия вместо выравнивающего ролика для искусственного увеличения текучести порошка лезвию сообщают колебания с ультразвуковой частотой.

Принципиально методы слияния порошковых оснований позволяют изготавливать композитные и функционально-градиентные изделия за счет возможности нанесения слоев порошков из различных материалов. Такая возможность реализована в технологии Laser Micro Sintering (LMS), разработанной в Лазерном институте Средней Саксонии (Laserinstitut Mittelsachsen in Mittweida, Германия) и коммерциализованной компанией «3D-Micromac AG» под торговой маркой «microFORM™». В данной технологии (рис. 3.34), так же как в СЛС, имеются два картриджа, в которые могут быть загружены различные порошки с целью получения композиционных изделий. Из картриджа порошок выдавливается в один из цилиндрических ракелей, который, совершая круговое движение, наносит слой порошка.



Рис. 3.34. Фотографии системы нанесения слоев порошка в технологии Laser Micro Sintering

### ***3.2.6. Косвенное формирование изделий***

Лазерное спекание – весьма энергозатратный процесс, в особенности при использовании металлических и керамических порошков, что определяет низкую эффективность формирования изделия полностью послойным лазерным спеканием. Такие способы, в результате которых готовое изделие формируется только за счет послойного синтеза, называют прямыми.

Прямые методы (Direct) предполагают создание на этапе формирования полностью готового изделия, обладающего всей совокупностью требуемых геометрических и физико-механических свойств. Прямое формирование может дополняться лишь незначительными процедурами постобработки, связанными с повышением качества по-

верхностей изделия и улучшением их внешнего вида: шпатлевание, полирование, грунтование, окрашивание, покрытие и т. п.

В отличие от прямых косвенные методы (Indirect) предполагают на этапе формирования создание лишь формы изделия. Ее закрепление – обеспечение физико-механических свойств, структуры и прочих характеристик – выносится на процесс постобработки: спекание, инфильтрация, ГИП и т. п. Косвенное формирование позволяет сократить энергоемкость процесса за счет решения некоторых задач изготовления изделий более энергоэффективными способами.

Типичным примером косвенного формирования является метод косвенного лазерного спекания металлических и керамических изделий, схема которого приведена на рис. 3.35.

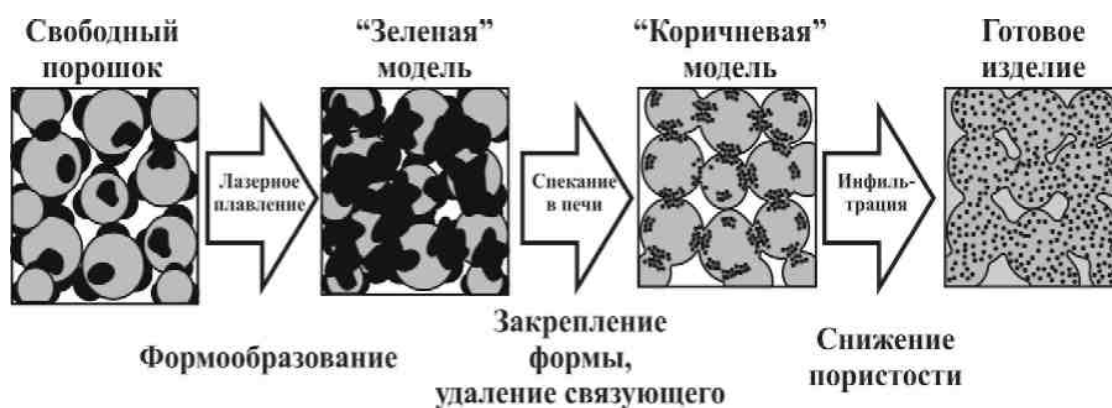


Рис. 3.35. Схема процесса косвенного лазерного спекания металлических и керамических изделий

Сущность последнего заключается в том, что строительный материал представляет собой композицию из легкоплавкого связующего и металлического или керамического порошка. Легкоплавкое связующее при воздействии лазерного излучения «склеивает» металлические или керамические частицы, формируя геометрию изделия. Полученную таким образом модель называют «зеленой» («green part»). Далее ее помещают в печь, в которой под воздействием температуры связующее выжигается, а частицы металлического или керамического порошка спекаются между собой. Такую модель, отличающуюся высокой пористостью, называют «коричневой» («brown part»). Для снижения пористости в печь добавляют материал-инфильтрат (например, бронзу), который вследствие капиллярного эффекта заполняет поры модели. В результате образуется функциональное изделие, обладаю-

щее высокой плотностью и требуемой совокупностью физико-механических свойств.

### **3.3. Методы листового ламинирования**

К методам (процессам) листового ламинирования – Sheet Lamination Process (SLP) [18] относят методы комбинированного субтрактивно-аддитивного формообразования, заключающиеся в придании определенной формы слоям листового материала и их скреплении между собой. Различные методы листового ламинирования (ЛЛ) различаются видом используемых листовых материалов, механизмами скрепления слоев и способами придания слоям определенной формы. В целом способы ЛЛ делятся на две группы, которые различаются порядком реализации основных операций процесса:

- ✓ «закрепление – форма» («bond-then-form»);
- ✓ «форма – закрепление» («form-then-bond»).

#### ***3.3.1. Технология изготовления объектов методом ламинирования***

Технология изготовления объектов методом ламинирования – Laminated Object Manufacturing (LOM) – один из наиболее ранних разработанных способов послойного синтеза. Процесс был коммерчески реализован в 1991 г. компанией «Helisys, Inc.» (США). В 2000 г. все патенты, относящиеся к LOM-технологии, были переданы компании «Cubic Technologies, Inc.» (США).

В качестве строительного материала при формировании изделий используется рулонный листовой материал из бумаги («LOMPaper») или пластмассы («LOMPlastic»). LOM-технология относится к группе способов «закрепление – форма».

Схема реализации процесса приведена на рис. 3.36.

Полоса конструкционного материала (рулона) подается на принимающий барабан с отработанным материалом с подающего таким образом, чтобы лист вплотную прилегал к платформе построения. Горячий ролик поджимает лист и соединяет его с ранее нанесенным слоем или платформой построения. Скрепление листов осуществляется за счет расплавления нанесенного на поверхность листа покрытия из термопластичного полимера. Далее луч лазера прорезает в листе контур слоя изделия и два прямоугольных контура, образующих

обойму, и разделяет область внутри нее на прямоугольные сегменты – «кирпичики» («bricks»). Затем барабаны установки далее перематывают материал в рулоне, при этом он отделяется от прикрепленного слоя по наружному контуру обоймы.

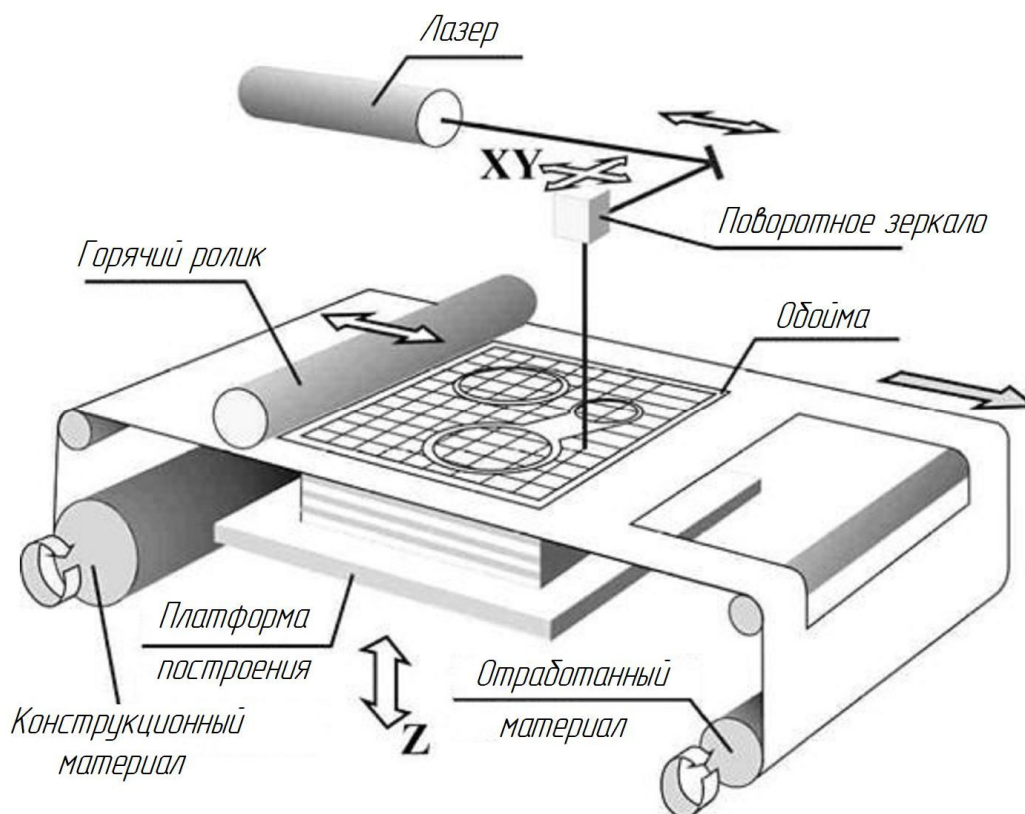


Рис. 3.36. Схема изготовления объектов по технологии Laminated Object Manufacturing (LOM) [27]

Отработанная часть материала сматывается в рулон на принимающем барабане, а с подающего в рабочую зону перемещается свежий участок конструкционного материала. Перед нанесением следующего слоя платформа построения опускается на величину толщины листа. Процесс повторяется до тех пор, пока изделие не будет сформировано полностью.

Обойма выполняет функцию скрепляющего элемента, удерживающего нарезанные «кирпичики». По окончании процесса формирования изделия в рабочей зоне образуется тело в форме параллелепипеда (рис. 3.37, а). После отделения обоймы от модели удаляют «кирпичики» (рис. 3.37, б), а освобожденное изделие при необходимости подвергают шлифованию (рис. 3.37, в) или шпатлеванию.

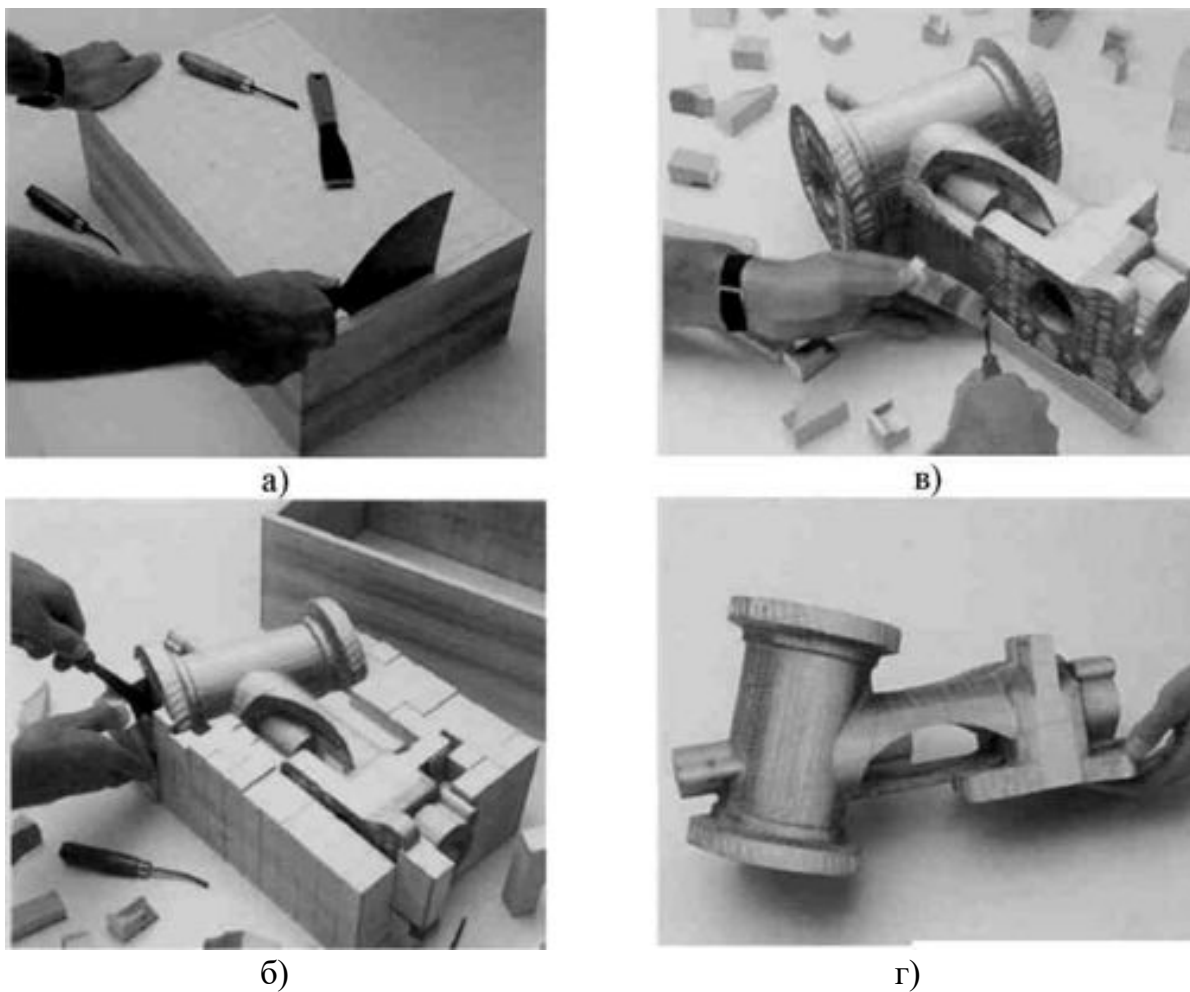


Рис. 3.37. Постобработка изделия, полученного LOM-технологией:  
 а – отделение обоймы; б – удаление «кирпичиков»; в – шлифование изделия;  
 г – готовое изделие после шлифования

LOM-технология позволяет получать изделия с толщиной слоя от 0,11 мм. В силу того что данный способ является комбинированным субтрактивно-аддитивным, ему присущ целый ряд **неоспоримых преимуществ**:

- ✓ высокая энергоэффективность процесса;
- ✓ возможность экономичного получения крупногабаритных изделий;
- ✓ в процессе обработки строительный материал не претерпевает изменения состояния, вследствие чего моделям несвойственно коробление.

Не менее важным достоинством следует считать нетоксичность используемых материалов и их невысокую стоимость.

В качестве **недостатков** LOM-технологии выделяют:

- ✓ трудоемкую ручную постобработку изделий;

- ✓ ограничения к сложности полостей изделия, связанные с обеспечением возможности извлечения из них «кирпичиков»;
- ✓ ограничения к минимальной толщине стенок изделий, поскольку они могут быть разрушены при извлечении «кирпичиков»;
- ✓ низкую атмосферную стойкость изделий, выражающуюся в том, что изделия легко впитывают влагу, теряя размерную точность и разрушаясь.

Основная сфера применения изделий LOM-технологии – модельная оснастка для различных процессов литья: в песчано-глинистые формы (в том числе с вакуумно-пленочной формовкой), по выплавляемым моделям, центробежного и вакуумного литья. Данный способ наиболее эффективен в случае крупногабаритных изделий. Максимальные габаритные размеры изделий –  $813 \times 559 \times 508$  мм.

Очень близкой к LOM-технологии по реализации является технология, известная как Slicing Solid Manufacturing (SSM), разработанная в университете Цинхуа (КНР). Вырезание контура осуществляется  $\text{CO}_2$ -лазером, а вместо горячего ролика для скрепления слоев используется нагревающая пластина. Установке SSM-1600, реализующей данную технологию, принадлежит рекорд по максимальным габаритным размерам получаемых изделий:  $1600 \times 800 \times 750$  мм [42].

На рис. 3.38 приведены модели, полученные LOM-технологией.

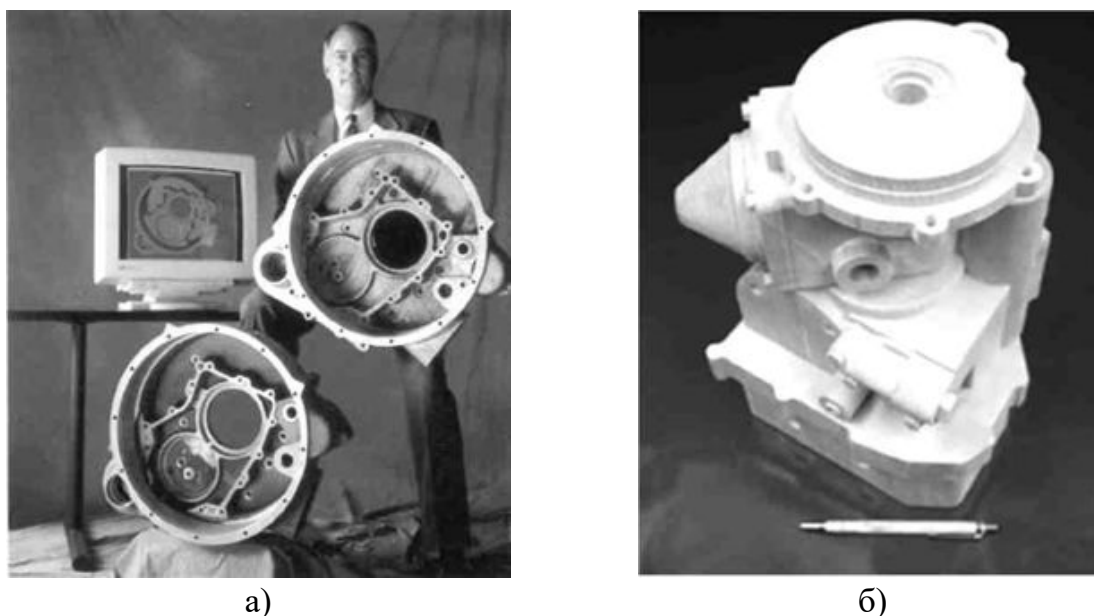


Рис. 3.38. Модели, полученные LOM-технологией: а – модель корпуса двигателя для литья в песчано-глинистые формы ( $787 \times 610 \times 280$  мм); б – конструкторский прототип гидромотора ( $310 \times 215 \times 225$  мм)



### 3.3.2. Технология бумажного ламинирования

Близким аналогом LOM-технологии также является технология бумажного ламинирования – Paper Lamination Technology (PLT), права на которую принадлежат японской «Kira Corporation» (ранее данная технология была известна под названием «Selective Adhesive and Hot Press» (SAHP)). PLT-технология построена на комбинации трех известных в полиграфии процессов: лазерная печать, ламинирование и вырезание плоттером. Схема PLT приведена на рис. 3.39.

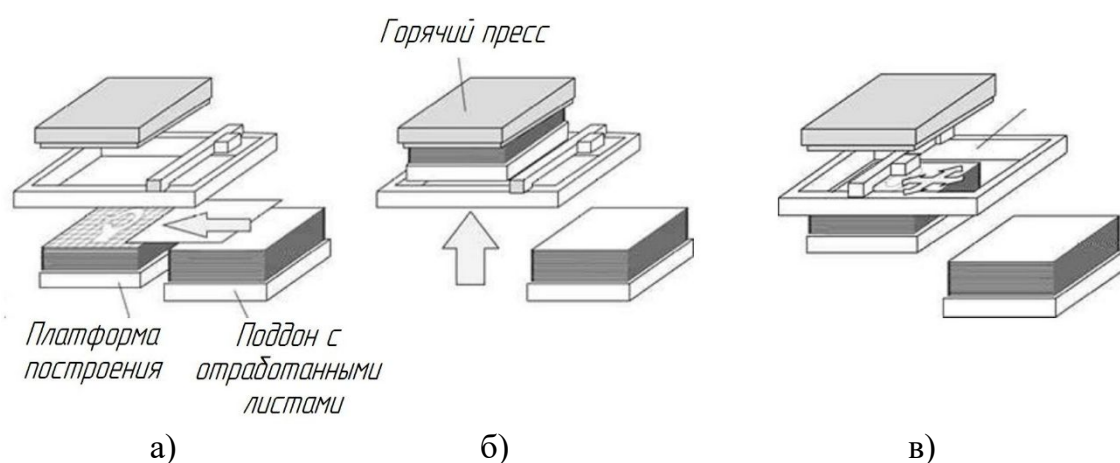


Рис. 3.39. Схема технологии бумажного ламинирования (PLT): а – укладка листа на платформу; б – горячее прессование; в – вырезание контура и «кирпичиков»

В качестве строительного материала выступают листы бумаги. На первом этапе подготавливается стопа листов, на которые посредством лазерной ксерографии наносится слой термопластичного полимера (в простейшем случае – тонер). Далее стопа укладывается на поддон, откуда верхний лист переносится на подвижную платформу построения, на которой формируется изделие (рис. 3.39, а). Затем платформа построения поднимается вверх, прижимая лист к горячему прессу (рис. 3.39, б). Вследствие теплового воздействия нанесенный на лист полимер расплавляется и скрепляет верхний лист с платформой или нижележащими листами. Помимо прочего горячее прессование способствует выравниванию поверхности формируемого тела. Далее платформа опускается до уровня режущего плоттера. Нож плоттера прорезает контуры сечения изделия и нарезает «кирпичики», аналогичные создаваемым в LOM-технологии (рис. 3.39, в). Далее наносится следующий лист материала и процесс повторяется до тех

пор, пока не будет получено готовое изделие. Система контролирует колебания фактической высоты формируемого тела и компенсирует возникающие погрешности.

Постобработка полученных изделий аналогична той, что используется в LOM-технологии. К модели могут применяться стандартные способы деревообработки. Основные механические свойства получаемых изделий на 50 % ниже аналогичных у деревянных моделей. Твердость PLT-моделей выше, чем твердость деревянных моделей, на 25 %. В целом достоинства и недостатки PLT совпадают с известными в LOM-технологии.

### 3.3.3. Способы листового ламинирования «форма – закрепление»

В данных способах форма листовому материалу придается прежде, чем он скрепляется с другими слоями. При этом возникает задача ориентирования слоев друг относительно друга, что сближает такие процессы с процессами сборки. Известно около пяти подобных технологий, однако они менее распространены по сравнению с LOM-технологией и ее аналогами.

Одной из коммерчески доступных технологий со схемой «форма – закрепление» является Stratoconception®, реализуемая компанией «CIRTES recherché technologique» (Франция) [49]. Схема процесса приведена на рис. 3.40.

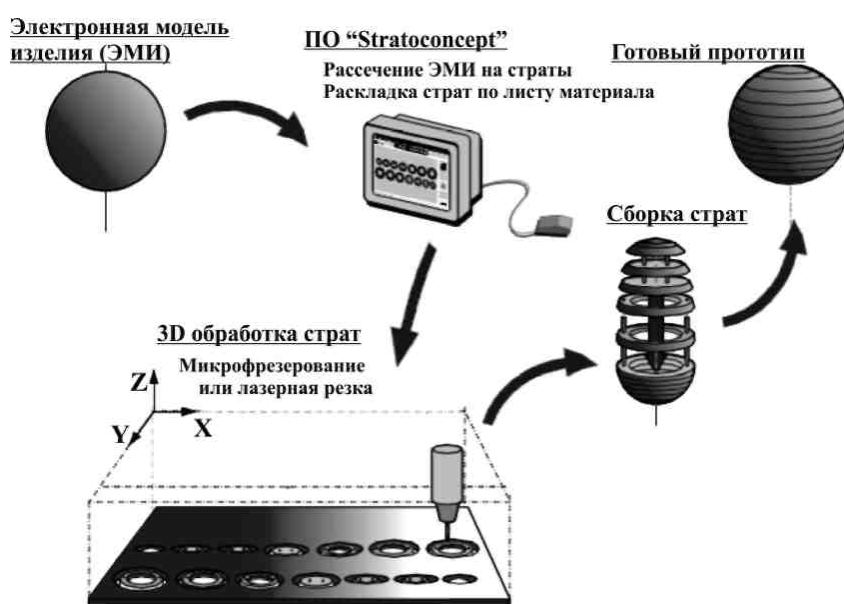


Рис. 3.40. Схема технологии Stratoconception® («CIRTES recherché technologique»)

Исходная электронная модель изделия (ЭМИ) посредством специального программного обеспечения (ПО) Stratoconcept® рассекается на слои, причем может использоваться аппроксимация высших порядков. Чтобы подчеркнуть отличие технологии от прочих способов послойного синтеза в Stratoconcept®, слои называют стратами. Порядок аппроксимации определяется возможностями технологического оборудования, выполняющего изготовление страт (рис. 3.41). ПО Stratoconcept® также производит раскладку страт по площади листового материала.

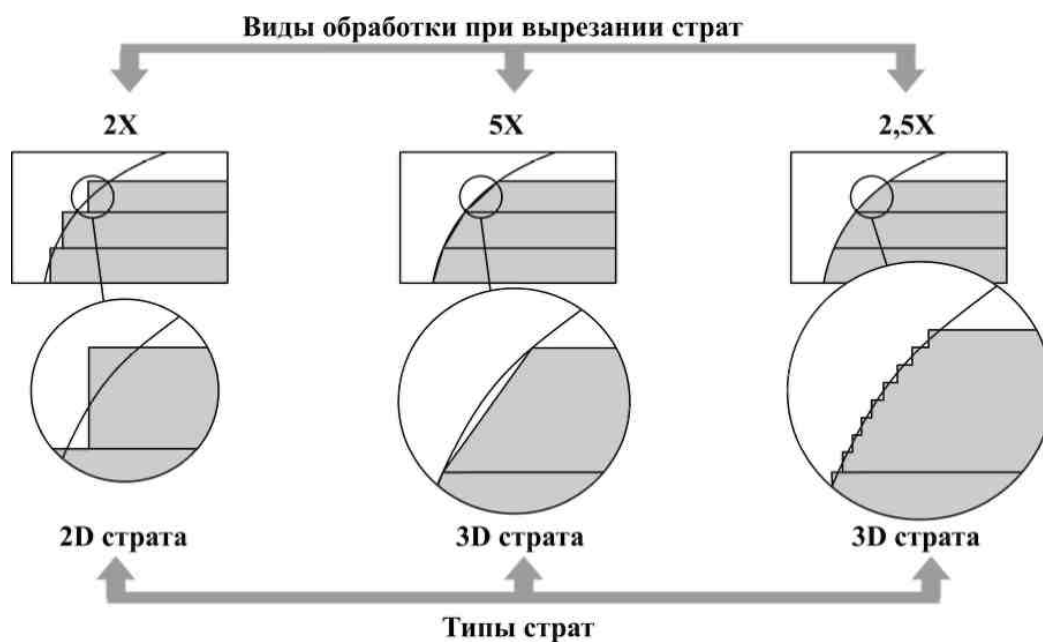


Рис. 3.41. Виды обработки и соответствующие типы страт в технологии Stratoconcept® («CIRTES recherché technologique»)

Затем выполняется изготовление страт посредством микрофрезерования (2- или 2,5-координатная обработка) или лазерной резки (2- или 5-координатная обработка). Полученные страты соединяются между собой с применением специальных вставок, выполняющих роль базирующих и армирующих элементов.

В качестве **достоинств** технологии Stratoconcept® производителем указаны [49]:

- ✓ низкие затраты на внедрение технологии, поскольку используются обычные микростанки (фрезерный с ЧПУ или лазерной резки), оригинальность технологии состоит в подготовке процесса и специальном программном обеспечении Stratoconcept®;

- ✓ низкие затраты на изготовление изделий;

✓ возможность использования любых материалов, подвергающихся обработке резанием;

✓ невысокие требования к квалификации персонала.

**Недостатки** данной технологии вполне очевидны:

✓ необходимость ручной сборки изделий;

✓ сложность изделий ограничена необходимостью размещения вставок;

✓ изделие представляет собой сборочную единицу, а не единую деталь;

✓ в случае сложной криволинейной геометрии изделий при использовании страт большой толщины могут быть не обеспечены требования точности аппроксимации номинальных поверхностей изделия.

Stratoconception® может быть использована для изготовления полноразмерных моделей, функциональных прототипов, литейных форм и моделей, изделий машин и т. п. (рис. 3.42).

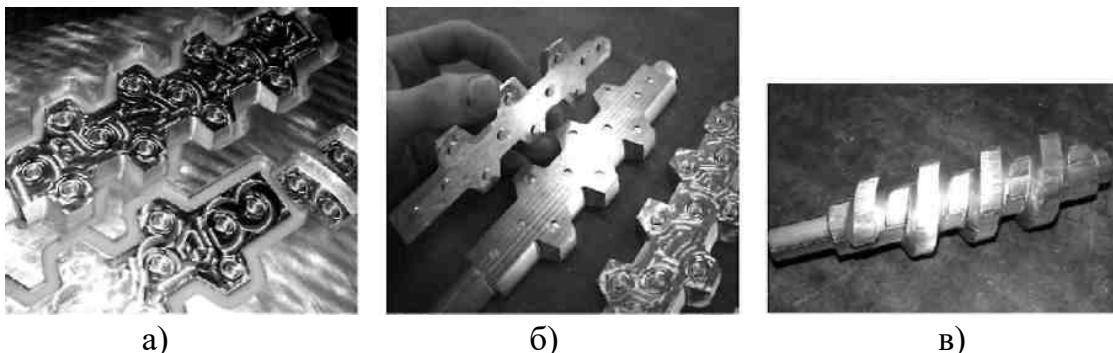


Рис. 3.42. Изделие «шнек» (Stratoconception®, «CIRTES recherche technologique»): а – получение страт; б – готовые страты; в – готовое изделие

Технически близкой к Stratoconception® считается технология Computer Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials (CAM-LEM), реализуемая американской компанией «CAM-LEM, Inc.» (3.43).

В качестве исходного материала используется лента, состоящая из керамического или металлического порошка и полимерной связки. CAM-LEM, Inc. предлагает для использования в процессе алюминиевую или циркониевую керамику и нержавеющую сталь 316L, возможно применение любых металлических и керамических материалов, подверженных спеканию.

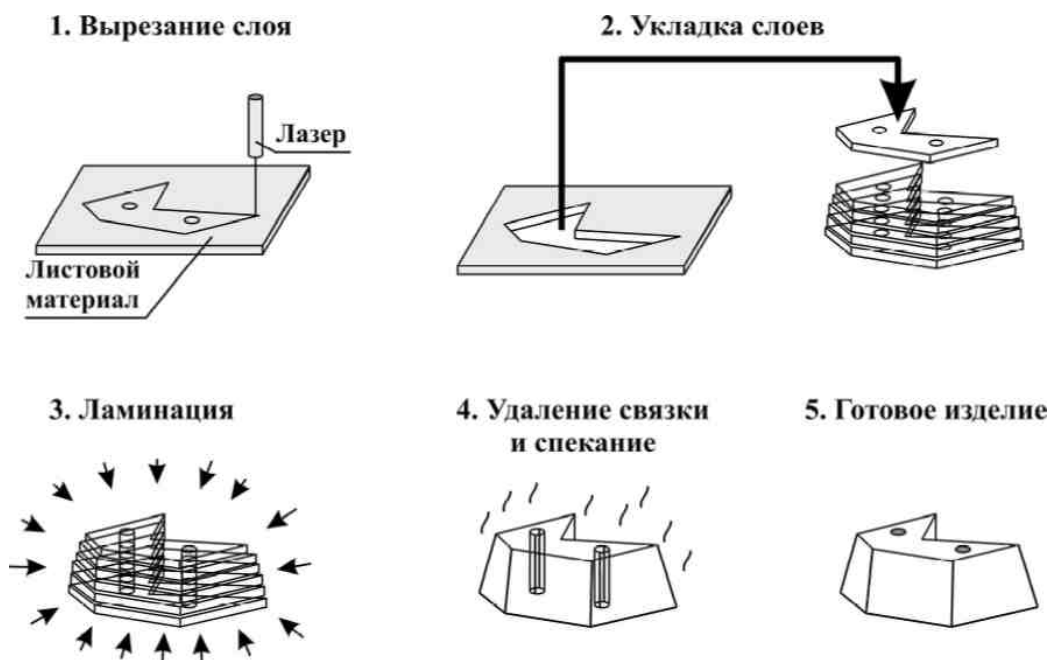


Рис. 3.43. Схема процесса SAM-LEM

Керамическая лента поставляется толщиной 0,2 – 1,3 мм, металлическая – толщиной 1,0 – 18,0 мм.

На первом этапе процесса из листового материала вырезаются слои будущего изделия (лазерная резка или микрофрезерование), после чего они в автоматическом режиме ориентируются и укладываются друг на друга. На следующем этапе выполняется ламинация слоев, при которой «зеленая деталь» подвергается давлению и нагреванию, в результате чего обеспечивается прикрепление слоев и надежный контакт между их поверхностями. На заключительном этапе изделие подвергается нагреву, что приводит к спеканию порошкового материала и выгоранию полимерной связки.

Способ позволяет получать полнофункциональные керамические и металлические изделия с механическими свойствами, аналогичными свойствам изделий, полученных традиционными способами изготовления.

В качестве основной сферы применения технологии SAM-LEM производитель указывает изготовление гидравлических микроустройств, полнофункциональных металлических и керамических изделий со сложными каналами и полостями, композиционных изделий (рис. 3.44).



Рис. 3.44. Изделие из стали – ротор (CAM-LEM, Inc.), полученное технологией Inteform CAM-LEM

Технология Offset™ Fabbing разработана компанией «Ennex Corporation» (США) и имеет общие черты с технологией бумажного ламинирования (PLT) [42]. Схема процесса приведена на рис. 3.45.

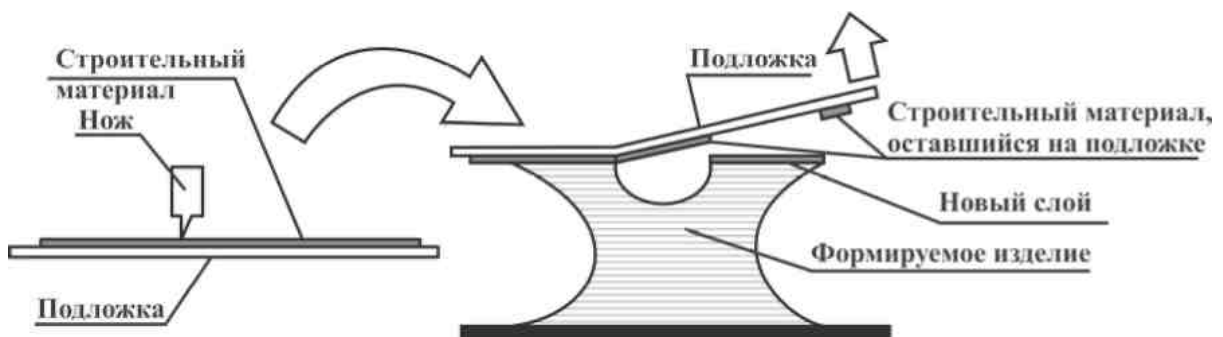


Рис. 3.45. Схема процесса Offset™ Fabbing («Ennex Corp.»)

В качестве исходного материала выступает самоклеющаяся бумага или пленка, состоящая из подложки и нанесенного на нее строительного материала с клеящим слоем. На первом этапе режущим плоттером лист самоклеющейся бумаги надрезается в соответствии с формой слоя. Далее надрезанный лист укладывается на ранее нанесенные слои строительным материалом вниз и приклеивается к ним. Затем подложку отрывают, удаляя вместе с последней надрезанные участки строительного материала. Процесс повторяют до тех пор, пока не будет полностью сформировано изделие.

### 3.3.4. Ультразвуковая консолидация

Ультразвуковая консолидация (УЗК) – Ultrasonic Consolidation (UC) является особым процессом листового ламинирования, основанным на скреплении слоев металлической ленты ультразвуковой сваркой и придании формы слоям путем фрезерования с ЧПУ. Процесс УЗК был запатентован Д. Уайтом в 1999 г. и коммерчески реализуется созданной им компанией «Solidica, Inc.» (США). В ряде материалов компании «Solidica, Inc.» процесс УЗК называется Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM).

Процесс УЗК осуществляется по схеме «закрепление – форма» (рис. 3.46).

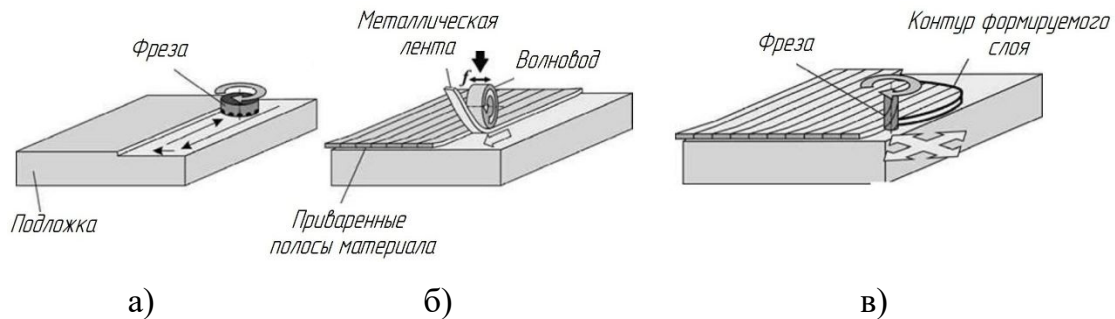


Рис. 3.46. Схема процесса ультразвуковой консолидации («Solidica, Inc.»):  
а – фрезерование подложки; б – нанесение металлической ленты;  
в – придание формы формируемому слою

Изделие формируется путем выполнения следующих этапов:

1. На плоской опоре установки УЗК устанавливается и закрепляется массивная подложка, верхняя поверхность которой фрезеруется на проход для обеспечения ее плоскостности и параллельности плоскости рабочих движений установки  $XU$  (рис. 3.46, а).

2. С барабана установки под волновод в виде ролика подается металлическая лента толщиной 100 – 150 мкм. Волноводу сообщаются ультразвуковые колебания частотой  $f = 20$  кГц в направлении оси ролика и нормальное усилие величиной порядка  $P = (500 - 2000)$  Н. Волновод прокатывается над поверхностью подложки, прижимая к ней ленту и приваривая ее ультразвуковой сваркой (рис. 3.46, б). Ряд лент образует новый слой изделия. Затем аналогично наносится следующий слой. Как правило, до перехода на следующий этап наносится 1 – 4 слоя.

3. Концевая фреза проходит по контуру нанесенных слоев, удаляя излишки нанесенной ленты, и образует участок боковой поверхности изделия заданной формы (рис. 3.4б, в).

4. Для создания последующих слоев изделия этапы 2 и 3 повторяются до тех пор, пока не будет получено изделие целиком.

При фрезеровании контуров используется аппроксимация высших порядков аналогично технологиям Stratoconception® и SAM-LEM.

В процессе изготовления между слоями могут укладываться армирующие волокна, а в полости помещаться микроустройства. Для облегчения процесса сварки подложка может подогреваться до температуры не более 200 °С.

В качестве строительного материала в процессе чаще всего используются алюминиевые, никелевые, никель-хромовые сплавы, нержавеющая сталь, латунь, медь, интерметаллиды TiAl (торговая марка «DuraTi™»). Изделия могут состоять из слоев различных материалов, т. е. быть композиционными.

Важнейшими **достоинствами** УЗК являются:

- ✓ высокая производительность и точность изготовления (определяется точностью механической обработки);
- ✓ отсутствие негативного воздействия высоких температур;
- ✓ возможность получения изделий сложной формы, в том числе с замкнутыми полостями;
- ✓ возможность изготовления композиционных изделий, включая армированные волокна, и изделий со встроенными микроустройствами.

Главной задачей при формировании изделий способом УЗК является обеспечение надежного скрепления нанесенных полос с нижележащим слоем, что достигается назначением соответствующего используемому материалу и его толщине режима: амплитуды ультразвуковых колебаний, величины нормальной силы, скорости движения волновода (ролика), температуры подогрева подложки. Наиболее полное скрепление обеспечивается между полосами первого слоя и подложкой. С удалением слоев от жесткой подложки количество дефектов в соединении полос увеличивается. Таким образом, свойства получаемых изделий являются неоднородными по их высоте.



На механические свойства получаемых изделий оказывает влияние и способ перекрытия полос нанесенного материала. Выделяют два способа перекрытия (рис. 3.47): перекрытие на половину ширины и случайное перекрытие. Экспериментальные исследования показали, что перекрытие на половину ширины обеспечивает более высокие механические свойства изделий [18].

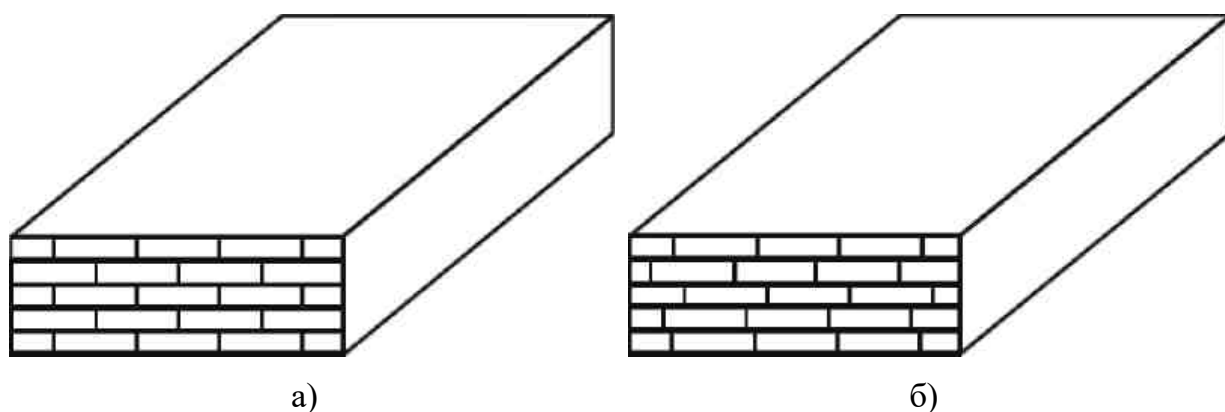


Рис. 3.47. Способы перекрытия полос нанесенного материала:  
а – на половину ширины; б – случайное

### 3.4. Методы послойной экструзии

Методы послойной экструзии заключаются в формировании слоев изделий путем подачи строительного материала в твердой фазе, дальнейшем его расплавлении и экструзии расплава, который при отверждении образует единицу объема изделия.

#### 3.4.1. Моделирование методом послойного наплавления

Моделирование методом послойного наплавления (Fused Deposition Modeling, FDM™) – наиболее известный способ послойной экструзии и одна из наиболее коммерчески успешных технологий аддитивного формообразования, а компания «Stratasys Inc.», поставляющая FDM-установки, является лидером среди производителей оборудования для синтеза объемных изделий.

Схема процесса FDM приведена на рис. 3.48.

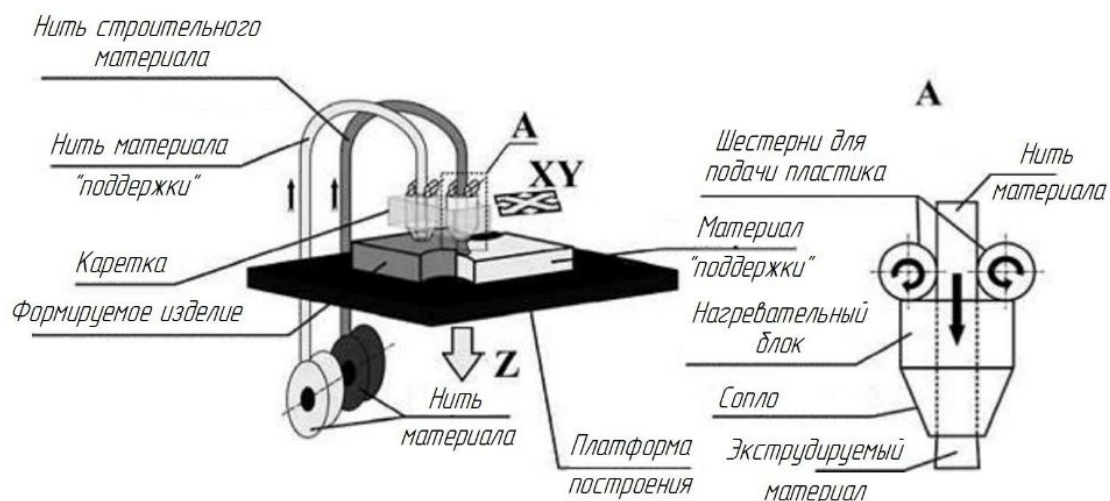


Рис. 3.48. Схема процесса методом послойного наплавления (Fused Deposition Modeling, FDM™)

Установка FDM содержит платформу построения, способную перемещаться в вертикальном направлении  $Z$ , на которой формируются изделия. Над платформой построения находится каретка, перемещающаяся в плоскости  $XY$ . Каретка содержит одну или несколько экструзионных головок (экструдеров), в которых между подающими роликами заправлена нить строительного материала или материала «поддержки». Нити хранятся намотанными на специальные катушки.

Цикл работы FDM-установки состоит в следующем. Каретка совершает движения в плоскости  $XY$ , обеспечивая перемещение экструзионной головки (экструдера) в соответствии с формой текущего слоя изделия. Одновременно с этим подающие ролики перемещают нить, проталкивая ее в подогревающую камеру. В последней материал нити расплавляется и под воздействием давления со стороны нити экструдировается через сопло на поверхность платформы построения или изделия. Таким образом экструдированный расплав укладывается на поверхность и, застывая, создает слой изделия. В качестве строительного материала используются термопластичные полимеры, технический воск, эластомеры. Далее платформа построения со сформированными слоями опускается и процесс повторяется.

Процесс создания изделий на основе послойного наплавления (FDM) требует создания поддерживающих структур. Вторая экструзионная головка (экструдер) может быть использована для нанесения материала «поддержки» или другого вида строительного материала, например, для получения разноцветных изделий.

Основными преимуществами FDM-технологии можно назвать [42]:

- ✓ сравнительно невысокие затраты на оборудование;
- ✓ используемые в процессе материалы нетоксичны;
- ✓ в процессе не образуются вредных веществ, что позволяет использовать FDM-технологии в офисных помещениях;
- ✓ изготовление полнофункциональных полимерных изделий с механическими свойствами, незначительно уступающими свойствам изделий, полученных литьем;
- ✓ минимальные непроизводительные потери строительного материала;
- ✓ простота удаления поддерживающих структур;
- ✓ простота перехода на новые виды строительного материала (достаточно заменить катушку или картридж);
- ✓ возможность изготовления цветных изделий (с ограниченным числом цветов).

Наиболее значимые недостатки FDM [50]:

- ✓ невысокая точность формируемых изделий;
- ✓ низкая производительность процесса, обусловленная необходимостью заполнения всего сечения слоя изделия со скоростью, ограниченной способностью обеспечить размещение расплава;
- ✓ непостоянство усадки строительного материала, связанное с разными условиями охлаждения расплава на различных участках слоя, вызывающее появление внутренних напряжений в изделиях и их коробление.

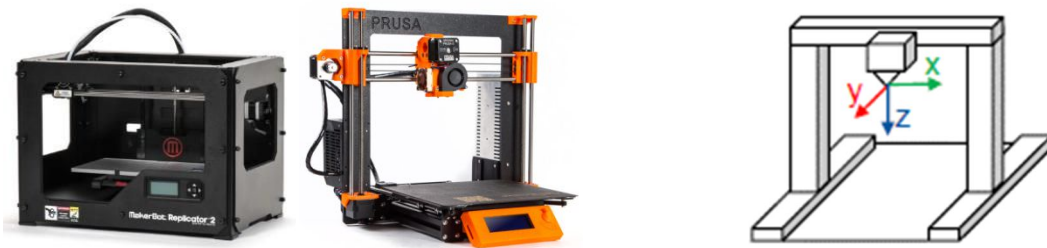
FDM-технология применяется для изготовления единичных полимерных функциональных изделий, в концептуальном моделировании, при изготовлении модельной оснастки для процессов литья.

### ***3.4.2. Типы кинематических схем установок аддитивного производства, основанных на FDM-технологии получения изделий***

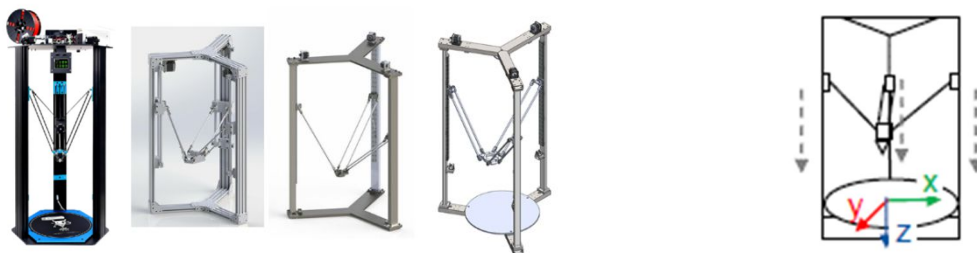
В настоящее время одним из классификационных признаков, по которому можно дифференцировать все установки аддитивного производства (3D-принтеры), основанные на использовании FDM-технологии получения изделий, получивших коммерческое применение, является тип кинематической схемы, используемой при построении оборудования. На сегодняшний день наибольшее распространение получили следующие кинематические схемы:

- ✓ 3D-принтер на основе прямоугольной (классической) декартовой системы координат;
- ✓ 3D-принтер на основе полярной системы координат;
- ✓ 3D-принтер на основе «Дельта»-кинематики и декартовой системы координат;
- ✓ 3D-принтер на основе робота-манипулятора (SCARA).

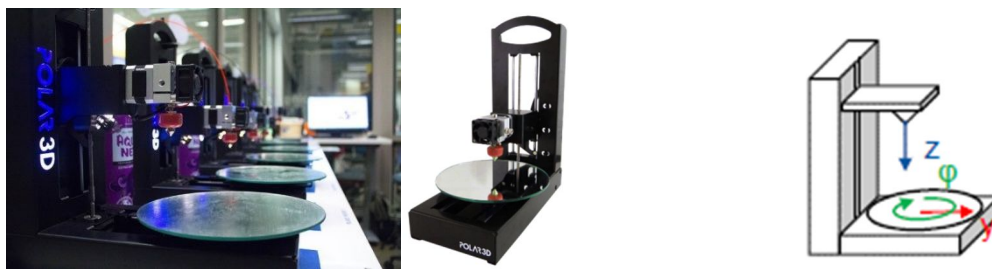
Внешний вид 3D-принтеров на основе всех указанных кинематических схем, а также их структурные схемы приведены на рис. 3.49.



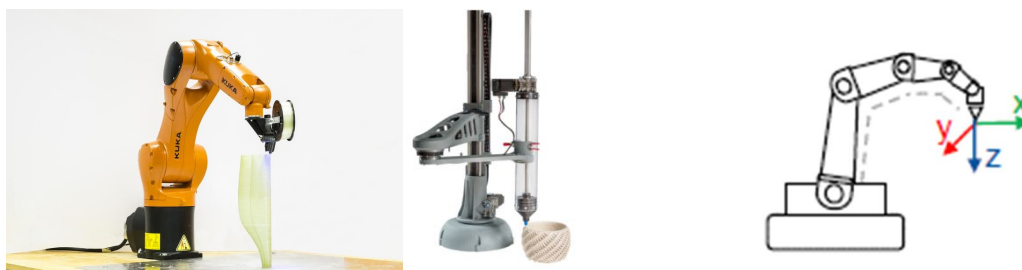
3D-принтер на основе прямоугольной (классической) декартовой системы координат



3D-принтер на основе «Дельта»-кинематики и декартовой системы координат



3D-принтер на основе полярной системы координат



3D-принтер на основе робота-манипулятора (SCARA)

Рис. 3.49. Внешний вид 3D-принтеров на основе различных кинематических схем и их структурные схемы

Сравнительная характеристика оборудования на основе различных кинематических схем по критериям качества получаемой поверхности, затрачиваемого времени печати и стоимости получаемого изделия представлены на рис. 3.50.

|                                  | Cartesian 3D Printer         | Polar 3D Printer             | Delta 3D Printer                  | Robot arm Printer |
|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
|                                  | 3 Axis                       | 3 Axis                       | 3 Axis                            | 3 Axis            |
| Printing Time                    |                              |                              |                                   |                   |
| Surface Quality                  |                              |                              |                                   |                   |
| Investment Costs                 |                              |                              |                                   |                   |
| Examples                         |                              |                              |                                   |                   |
|                                  |                              |                              |                                   |                   |
| <i>Ultimaker S3</i> <sup>1</sup> | <i>Polar 3D</i> <sup>2</sup> | <i>Delta Go</i> <sup>3</sup> | <i>Yizumi SpaceA</i> <sup>4</sup> |                   |

**Graduation:**  
high   
middle   
low

**Sources:**  
1) <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-3/specifications>  
2) <https://polar3d.com/>  
3) <https://www.deltaprinter.com/product/delta-go/>  
4) <https://www.yizumi-germany.de/spacea-additive-fertigung/>

Рис. 3.50. Сравнительная характеристика оборудования с различными кинематическими схемами

Выбор кинематики 3D-принтеров зависит от требований к технике и сферы их применения.

1. Самыми распространенными вариантами остаются модели на основе прямоугольной (классической) декартовой системы координат. Они совмещают высокую точность, хорошую скорость работы, небольшие габаритные размеры. Их можно использовать для любительской и профессиональной трехмерной печати.

2. CoreXY и H-Vot – это разновидности кинематики на основе прямоугольной (классической) декартовой системы координат. Они отличаются повышенной детализацией заготовок, подходят для профессионального использования. Их недостаток – сложность в процессе эксплуатации. Пользователю необходимо постоянно следить, чтобы ремни не соприкасались с посторонними предметами и были хорошо натянуты.

3. 3D-принтер на основе «Дельта»-кинематики и декартовой системы координат – нераспространенные модели, чьим уязвимым местом является точность печати. Принтеры, работающие на кинемати-

ке типа «Дельта», отличаются от своих конкурентов рядом особенностей. Стол остается неподвижным, а для перемещения печатающей головки используются сразу три установленные оси. В таких устройствах нет деления на оси  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Чтобы переместить каретку вбок, нужно опустить одну ось, а оставшиеся приподнять. В процессе работы с оборудованием возникают проблемы с калибровкой, а также с выбором экструдера.

4. 3D-принтер на основе полярной системы координат выпускает только одна компания – «Polar 3D» (США). Суть такой кинематической схемы заключается в том, что в ней нет позиционирования по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Положение экструдера задается показателем угла и радиуса. Платформа у полярных 3D-принтеров отличается круглой формой, она движется поступательно и вращается только по горизонтали. Экструдер перемещается вверх и вниз. Эти устройства не могут обеспечить высокую точность получаемого изделия, поэтому на данный момент их используют только в образовательных целях. Во время работы не прогревается платформа, что ограничивает выбор материалов.

5. 3D-принтер на основе робота-манипулятора (SCARA – Selective Compliance Articulated Robot Arm) – универсальное устройство, которое используются не только для изготовления моделей. Это конструкция, в основе которой лежит кинематика робота-манипулятора с механическим программируемым манипулятором-захватом и экструдером. Экструдер может перемещаться в разных направлениях: послойно, по сложным траекториям в трех измерениях, под разными углами. Благодаря такому набору функций удастся создавать изделия сложной пространственной геометрии. Эти устройства также могут фрезеровать, сваривать, покрывать краской, по точности они уступают моделям на основе прямоугольной (классической) декартовой системы координат. 3D-принтеры на основе робота-манипулятора (SCARA) – это одна из современных кинематических схем, которую, однако, можно использовать не во всех сферах из-за ее высокой цены. Она отличается высокой скоростью печати.

Кинематика на основе прямоугольной (классической) декартовой системы координат имеет две разновидности – CoreXY и H-Bot.

В CoreXY есть два подающих ремня, а в H-Bot установлен только один, но длинный – это основное отличие этих двух разновидностей (рис. 3.51).

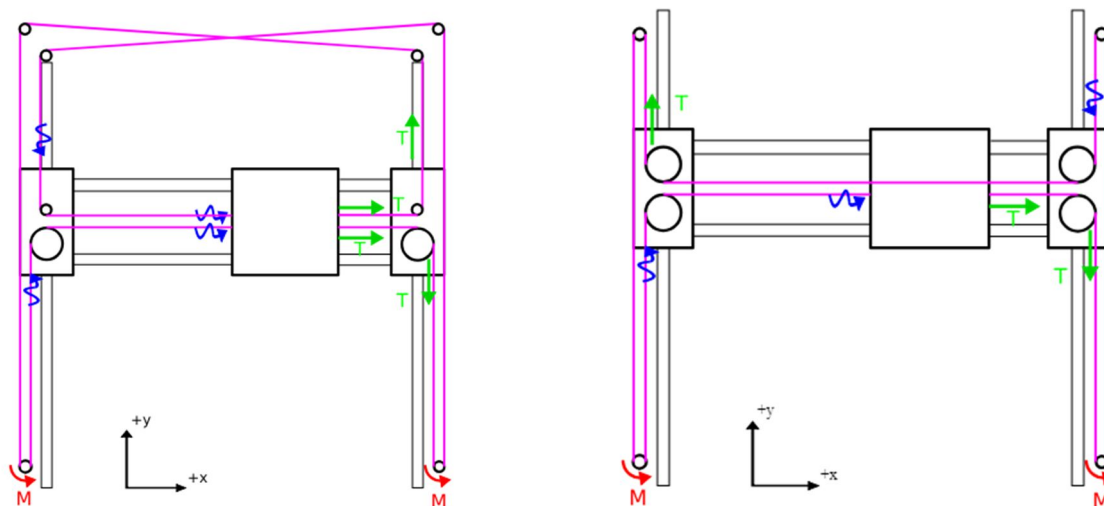


Рис. 3.51. Разновидности кинематики на основе прямоугольной (классической) декартовой системы координат: CoreXY (слева) и H-Bot (справа)

Общая черта этих разновидностей заключается в том, что платформа движется только по оси  $Z$ . Горизонтальные оси  $X$  и  $Y$  перемещаются при помощи пары двигателей, закрепленных на раме. За движение по горизонтальным осям отвечают два двигателя, по вертикальной – один. Такая кинематика распространена не только в любительских принтерах, но и профессиональных.

3D-принтеры, работающие на основе CoreXY и H-Bot, имеют бóльшую стоимость, чем модели с приводом на каждую ось. Для производства их корпусов используют металлические сплавы или композитные материалы. Рельсовые направляющие раскрывают потенциал качественной печати. Такая кинематика позволяет достигать хорошей детализации при быстрой печати.

#### **Преимущества CoreXY и H-Bot:**

- ✓ высокая скорость печати;
- ✓ качественная детализация моделей;
- ✓ профессиональный класс использования.

#### **Недостатками** являются:

- ✓ H-Bot не реализуют на стальных валах;
- ✓ нужно постоянно следить за натяжением ремня, чтобы исключить возникновение люфта;



- ✓ высокая стоимость оборудования;
- ✓ быстрый износ ремней при наличии контакта с другими элементами оборудования;
- ✓ шкивы, по которым двигаются ремни, должны быть расположены строго перпендикулярно друг другу.

### 3.4.3. Экструдеры для FDM-принтеров

Экструдер – важная часть 3D-принтера, которая осуществляет фактическую печать. На рынке 3D-принтеров можно встретить большое разнообразие экструдеров с различными конструктивными особенностями (рис. 3.52).

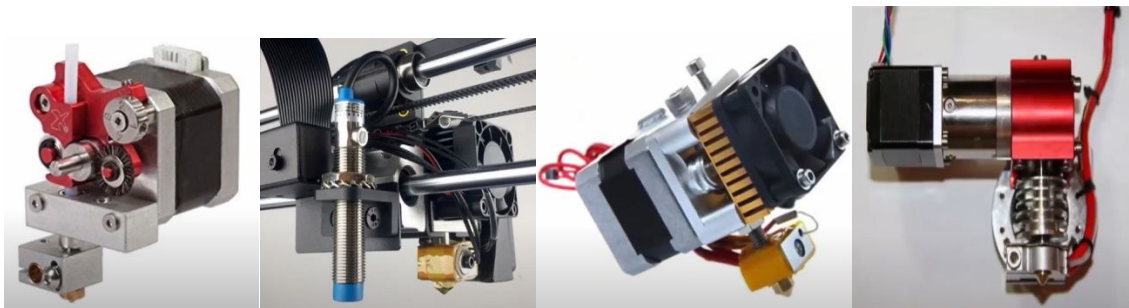


Рис. 3.52. Внешний вид различных вариантов конструкций экструдеров

Его можно сравнить с печатающей головкой обычного струйного принтера, только вместо чернил используется пластиковая нить. Экструдер состоит из двух зон: холодной (coldend) (корпус с подающим механизмом) и горячей (hotend) (сопло, нагревательный блок, термодатчик) (рис. 3.53).

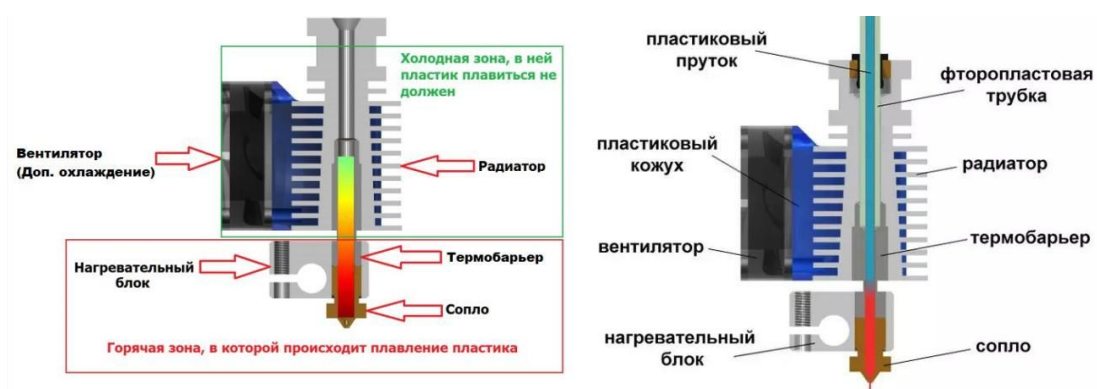


Рис. 3.53. Составные части экструдера



Зона coldend относится к верхней части экструдера и служит для подачи материала в hotend. В данной части нагрева и плавления материала не происходит.

Внешний вид и расположение coldend зависит от того, какой вид экструдера используется: с прямой подачей – direct или bowden, когда механизм подачи материала находится отдельно от зоны hotend (рис. 3.54).



Рис. 3.54. Виды экструдеров: direct (слева) и bowden (справа)

Каждый вид экструдеров обладает своими преимуществами и недостатками:

*Тип экструдера direct:*

**Преимущества:**

- ✓ возможна печать гибкими пластиками даже на больших скоростях;
- ✓ незначительная погрешность при подаче пластика за счет минимального расстояния подачи;
- ✓ быстрая и удобная замена материала печати.

**Недостатки:**

- ✓ суммарный вес каретки больше, чем в «bowden»-экструдерах (увеличивается инертность);
- ✓ более сложная конструкция каретки (необходимо расположить все элементы на каретке).

*Тип экструдера bowden:*

**Преимущества:**

- ✓ уменьшается суммарный вес каретки;
- ✓ небольшие габаритные размеры печатающей головки.

### Недостатки:

- ✓ сложность (невозможность) печати гибкими материалами (FLEX, RUBBER и др.);
- ✓ требуется более мощный двигатель для подачи пластика (зачастую даже с редуктором);
- ✓ увеличивается погрешность подачи прутка из-за большой длины трубки.

Система подачи материала (coldend) обычно состоит из шестерни для подачи пластика, механизма прижима пластика к подающей шестерне, вспомогательных шестерен и каркаса или корпуса подающего механизма (рис. 3.55).



Рис. 3.55. Примеры составных частей механизма системы подачи материала

Рассмотрим каждый из представленных элементов более подробно.

**Шестерни для подачи пластика** – это шестерня, которая с помощью зубцов подает нить материала в hotend. Расположение и форма зубцов этой шестерни имеет большое значение для функционала подающего механизма, так как именно они непосредственно подают материал. Зубцы могут располагаться по всему телу шестерни или быть выполнены в виде полукруглой канавки на отдельном участке шестерни. В зависимости от диаметра нити, под которую изготовлена шестерня, эти углубления могут иметь разную ширину (рис. 3.56). Форма данных зубцов также может быть различной: плоской или со специальными насечками для лучшего сцепления с пластиковой нитью.

Количество зубьев шестерни также может быть различным, наиболее часто используемыми вариантами являются шестерни с двадцатью двумя и двадцатью шестью зубцами. Шестерни для подачи

пластика изготавливают из меди, латуни, алюминия, титанового сплава и нержавеющей стали.



Рис. 3.56. Разновидности шестерен для подачи пластика

**Механизм прижима пластика к подающей шестерне** служит для прижатия нити к подающей шестерне. Конструкции данного механизма могут иметь различное исполнение, но наличие пружины является общим элементом всех существующих конструкций. Прижимной механизм имеет довольно простую конструкцию: прижимной рычажок с одной стороны имеет подшипник (иногда с канавкой для устойчивой фиксации нити в требуемом положении), а в другой конец упирается пружина. Усилие прижима можно регулировать с помощью винта. Это необходимо для того, чтобы обеспечить требуемую величину прижима нити из различных пластиков, так как они имеют разные физико-механические свойства (от хрупких до эластичных). Если материал хрупкий, а сила прижима его шестерен избыточна, то он будет крошиться и нарушится его стабильная подача в «hotend».

А при использовании эластичных материалов нить даже при небольшом усилии воздействия со стороны подающей шестерни будет изменять свой диаметр и при недостаточной силе прижима подающего механизма шестерня будет просто скользить по поверхности нити, не подавая ее в «hotend». Кроме подшипника прижимать нить подаваемого материала к шестерне для подачи пластика может и другая шестерня. Если нить захватывают две шестерни, то их сцепление с материалом повышается, что может способствовать увеличению усилия подачи материала в «hotend» (рис. 3.57).



Рис. 3.57. Механизм подачи пластика с двумя шестернями

**Корпус механизма подачи** служит важной частью, так как именно в нем крепятся все функциональные составляющие механизма подачи материала. Корпус механизма подачи может содержать радиатор при использовании воздушного охлаждения или так называемый «водоблок» при использовании водяного охлаждения «hotend» (рис. 3.58). Корпус может быть изготовлен как из различных пластиков, так и всевозможных металлов и их сплавов.

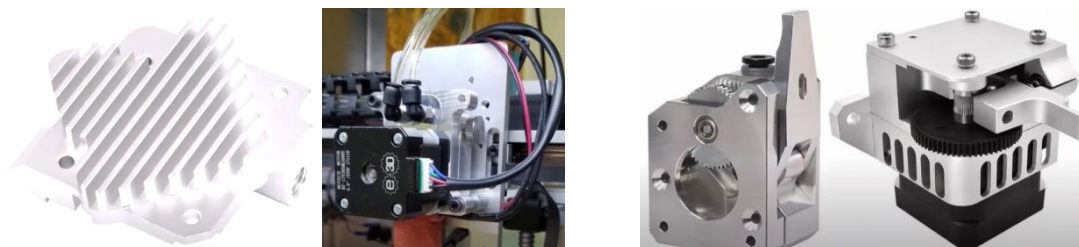


Рис. 3.58. Варианты охлаждающих систем (воздушная и водяная – слева) и внешнего вида корпуса (справа)



Корпус из металла имеет привлекательный внешний вид, но более тяжелый по сравнению с пластиковым. Пластиковый корпус за счет меньшего веса позволяет использовать более высокие скорости печати.

Для придания вращения шестерням подачи нити пластика используются **шаговые двигатели**. Наиболее популярным можно назвать двигатель модели Nema 17 (КНДР). При наличии редуктора, обеспечивающего повышенное усилие подачи материала, могут использоваться двигатели меньшего типоразмера, например Nema 11 (КНДР). Шаговые двигатели больших габаритов и массы используются в bowden, а меньших – в direct-экструдерах (рис. 3.59).

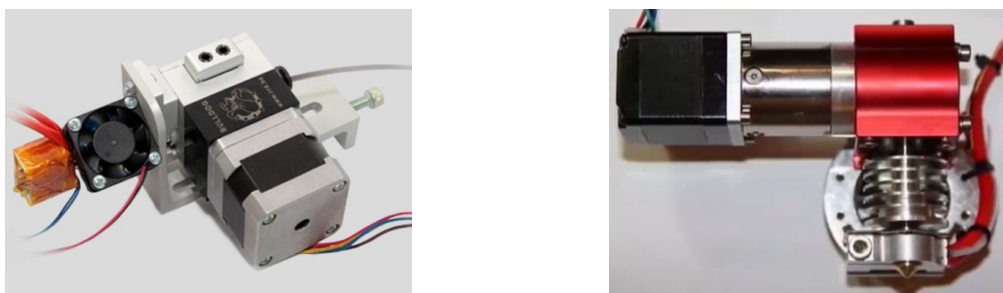


Рис. 3.59. Экструдеры на базе различных моделей шаговых двигателей: Nema 17 (справа) и Nema 11 (слева)

Существуют типовые компоновки экструдеров с механизмами подачи, которые наиболее часто используются различными производителями. К ним относятся МК-8, BMG, Titan и B2D (рис. 3.60).

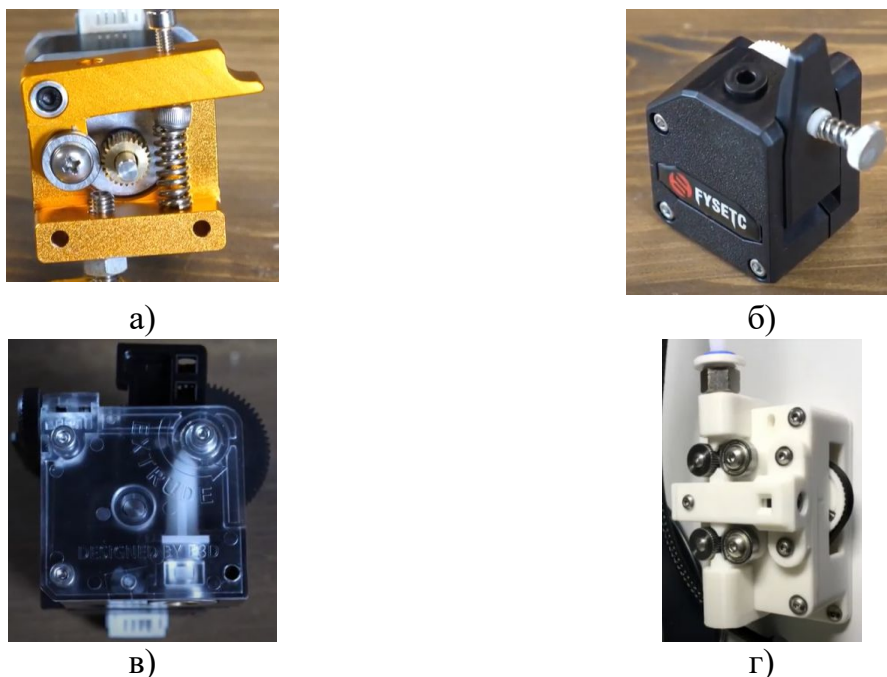


Рис. 3.60. Примеры механизмов подачи материала: а – МК-8; б – BMG; в – Titan; г – B2D

Нижняя часть экструдера (зона hotend) – это часть экструдера, в которой происходит переход материала нити из твердого состояния в жидкое. Основными компонентами, из которых состоит «hotend», являются: радиатор, обеспечивающий отвод тепла от термобарьера; термобарьер, через который нить материала поступает в нагретое сопло, основная функция которого – останавливать распространение тепла от нагревательного блока по всей печатающей головке; нагревательный блок – связующее звено (корпус) для нагревательного элемента, термистора, сопла и термобарьера, через которые происходит нагрев материала; нагревательный элемент служит для нагрева пластиковой нити до нужной температуры; термистор – датчик, отслеживающий значение температуры в нагревательном блоке; сопло – часть экструдера, где пластик разогревается до рабочей температуры и на выходе приобретает требуемый диаметр (рис. 3.61).

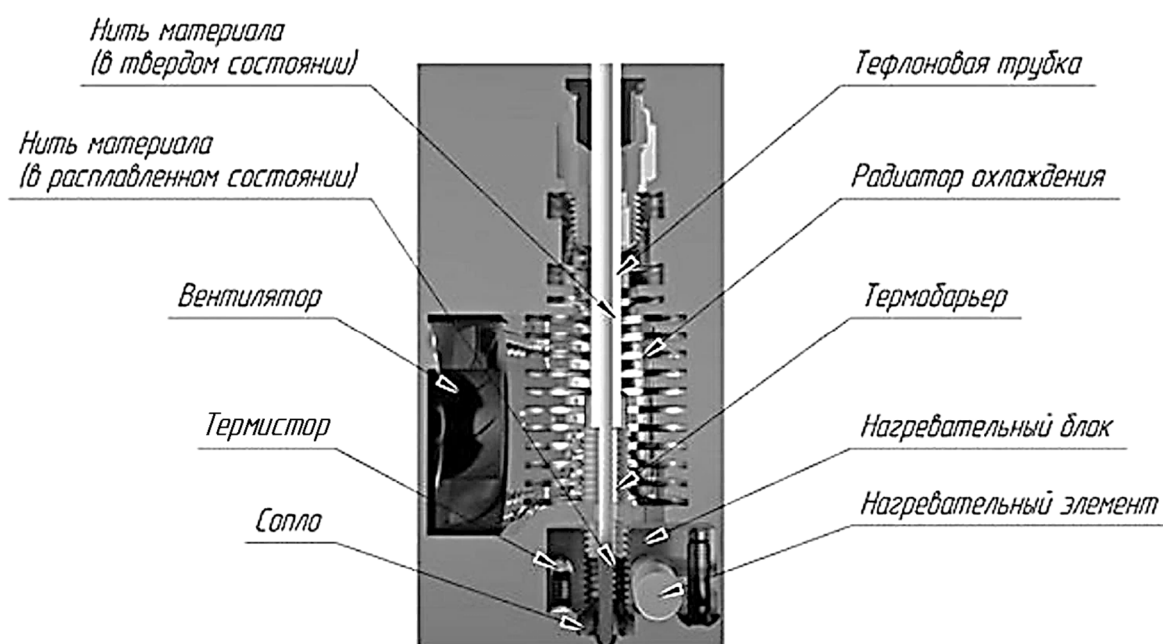


Рис. 3.61. Устройство нижней части экструдера («hotend»)

При подаче материала (в твердом состоянии) нить пластика через тефлоновую трубку поступает в радиатор, проходит через термобарьер и в зоне его контакта с соплом превращается в расплавленный материал. Еще не расплавленная часть материала проталкивает расплавленную нить дальше. Расплавленный пластик проходит через сопло, приобретая требуемый диаметр, и наносится на платформу построения или сформированный слой. У hotend есть и другая важная

функция, связанная с контролем температуры. Пластиковая нить должна быть расплавлена именно в нижней части hotend и, находясь в термобарьере, оставаться в твердом состоянии. Для этого поверх термобарьера расположен радиатор, на котором для более эффективного охлаждения может быть установлен вентилятор. Если пластик плавится в слишком больших объемах, в термобарьере это может вызвать сбой при печати, например, накопившийся там расплавленный пластик при остывании может создать плотную «пробку», перекрыв подачу материала. На рынке представлено большое количество разнообразных конструкций hotend, отличающихся комбинацией составных частей как для бюджетного сегмента экструдеров, так и для более дорогих моделей (рис. 3.62).

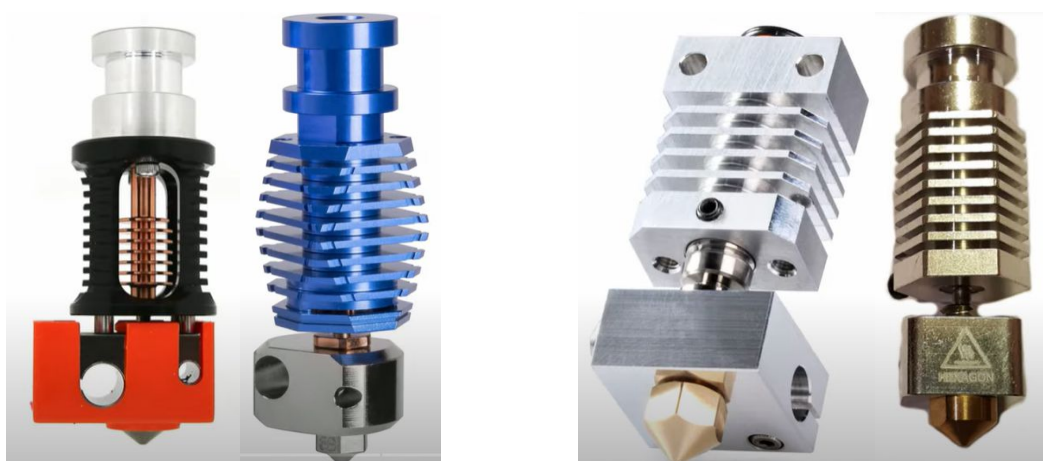


Рис. 3.62. Варианты исполнений hotend от различных производителей

Рассмотрим основные составные части «hotend» более подробно. В конструкции каждого экструдера для охлаждения термобарьера предусмотрен **радиатор** (иногда совместно с вентилятором). Обычно радиатор имеет пластинчатое строение, а внутри него располагается тефлоновая трубка. Радиаторы могут быть цилиндрической, гексагональной и прямоугольной формы. Наиболее часто для изготовления радиаторов используют алюминий и медь. Отводить тепло от радиатора можно как при помощи кулера, так и жидкостного охлаждения (рис. 3.63).

Системы жидкостного охлаждения используют для высокотемпературной печати профессионального сегмента. При работе 3D-принтера **термобарьер** передает тепло на так называемый водоблок, к которому подведены две трубки. По одной жидкость попадает

в водоблок, охлаждает его, а по другой – вытекает из него, чтобы охладиться и вновь вернуться в водоблок.

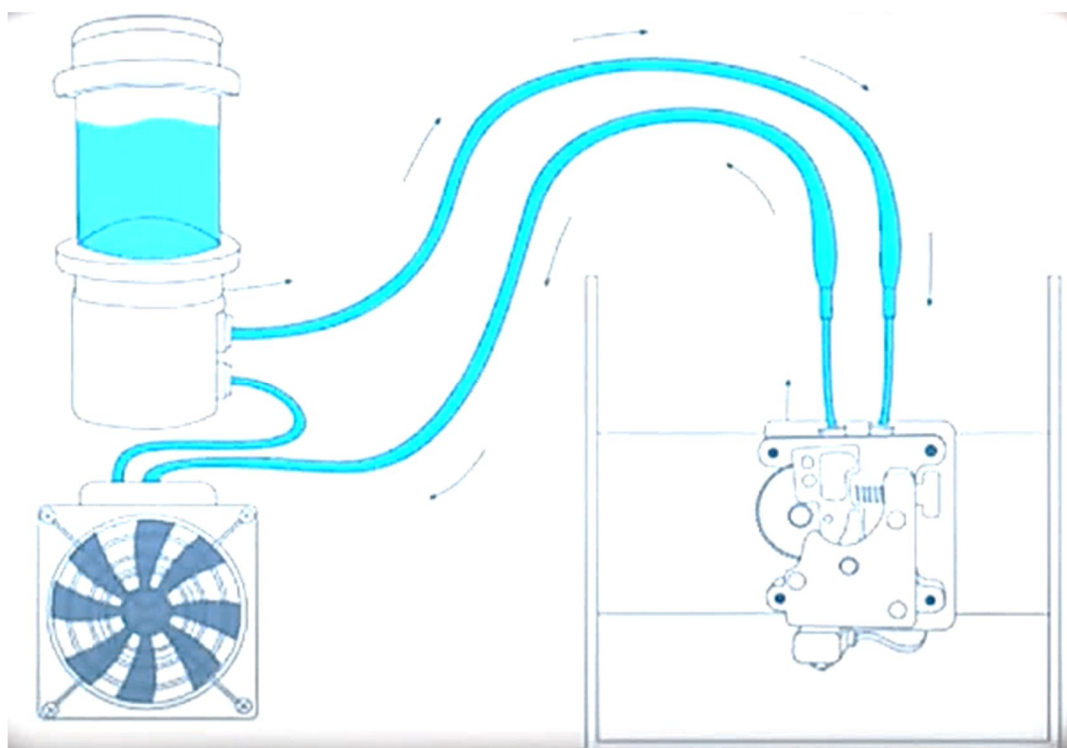


Рис. 3.63. Система жидкостного охлаждения hotend

По каналу термобарьера происходит подача пластика в нагретое сопло. Один конец термобарьера соединяется с радиатором, а другой – с нагревательным блоком, с другой стороны которого устанавливается сопло. Термобарьер и сопло должны плотно прилегать друг к другу, образуя герметичный канал для подачи нити материала. Термобарьеры изготавливаются из стали, титана, могут быть комбинированными (биметаллическими). Внутренняя часть биметаллического термобарьера выполнена из стали, а наружная – из меди. Высокая теплопроводность меди позволяет быстро отвести тепло от термобарьера к радиатору. Для снижения трения нерасплавленной нити материала о внутренние стенки термобарьера внутри него устанавливают тефлоновую трубку. Термобарьеры различаются диаметром, длиной и шагом резьбы, предусмотренными конкретным производителем.

Основной функцией **нагревательного блока** является передача тепла от нагревательного элемента на сопло, который нагревает мате-



риал нити до рабочей температуры. Блок имеет резьбовое отверстие для термобарьера и сопла, а также отверстия для установки нагревательного элемента и термистора для отслеживания температуры и ее контроля. Нагревательные блоки изготавливают из алюминия, латуни и меди. Латунные и медные блоки имеют большую массу, которая компенсируется лучшими свойствами теплопроводности. На нагревательные блоки из меди и латуни часто наносят покрытие, снижающее прилипание к ним материала во время печати. Стандартный нагревательный блок по форме представляет собой параллелепипед. Для высокотемпературной и высокоскоростной печати нагревательные блоки имеют большую высоту.

Изменение температуры пластиковой нити осуществляется **нагревательным элементом**, который устанавливается в отверстие нагревательного блока. Нагревательные элементы отличаются рабочим напряжением (12 В, 24 В, 220 В), мощностью (40 Вт, 100 Вт, 200 Вт), размерами нагревательного элемента. Используемое напряжение зависит от напряжения блока питания 3D-принтера. Мощность влияет на время и максимальную температуру разогрева hotend.

Для того чтобы отслеживать и контролировать температуру нагревательного блока, используют **термисторы** (термопары). Они отличаются максимальной рабочей температурой. В персональных 3D-принтерах используются термисторы с максимальной температурой 400 °С. При выборе термистора необходимо обращать внимание на его погрешность измерения.

**Сопла** изготавливают из разных материалов, они могут иметь разную форму и размеры. От материала, из которого изготовлено сопло, зависит не только скорость нагрева пластика, но и долговечность самого сопла. Используемые при печати материалы имеют достаточно высокую твердость, вследствие чего, проходя через канал сопла, они изнашивают его и изменяют его форму, что приводит к погрешностям формы слоев модели (рис. 3.64). Сопла изготавливают из латуни, нержавеющей стали, титана, а также со вставками из искусственного граната (рис. 3.65).

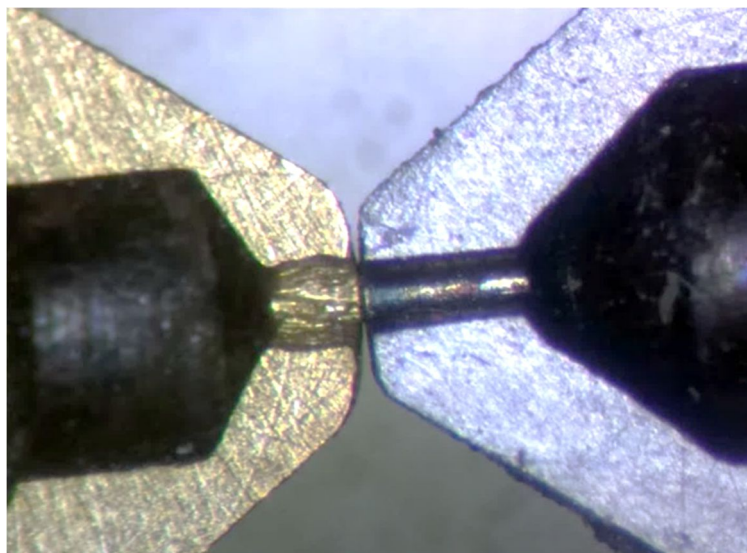


Рис. 3.64. Изображение изношенного канала сопла



Рис. 3.65. Сопла из различных конструкционных материалов: слева направо – латунь, нержавеющая сталь, титан, со вставкой из искусственного граната

#### ***3.4.4. Поддерживающие структуры***

В технологии FDM использование поддерживающих структур («поддержек») является обязательным. Из «поддержек» формируется основание, на котором изготавливается деталь. Также «поддержки» служат в качестве опоры для нависающих элементов изделия. «Поддержки» выполняются в виде полос толщиной 0,5 мм с шагом 3,8 мм. В FDM-технологии применяют два вида поддерживающих структур: выполненные из строительного или другого материала.

В первом случае сформированные «поддержки» удаляются при постобработке вручную механическим воздействием (отщелкиваются). Такой вид «поддержек» в документах компании «Stratasys Inc.» называется BASS™ – Break-Out Support System и чаще применяется для строительных материалов на основе поликарбоната и ряда других полимеров. «Поддержки» BASS™ могут использоваться на оборудо-

вании с единственной экструзионной головкой (экструдером). Механически удаляемые «поддержки» ограничивают геометрию получаемых изделий: тонкостенные элементы модели могут разрушиться в процессе удаления «поддержек», из некоторых замкнутых полостей «поддержки» не могут быть удалены механически.

Обычно используют отличающиеся друг от друга и имеющие разные цвета строительный материал и материал «поддержек» (рис. 3.66).

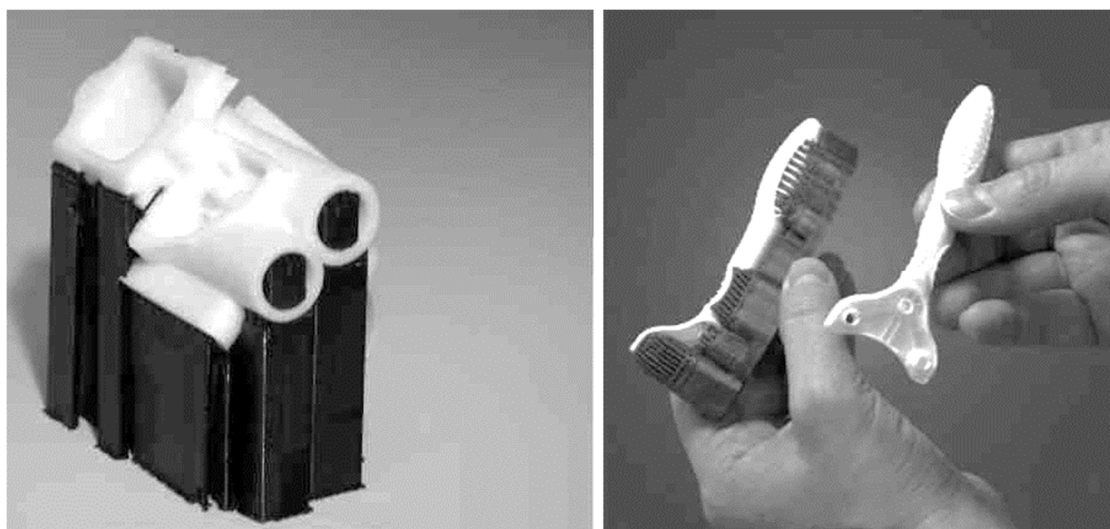


Рис. 3.66. Поддерживающие структуры в технологии FDM [51, 52]

Разные цвета позволяют контролировать полное удаление «поддержек». При этом они могут быть устранены механически (BASS™) либо растворением. В таком случае используется специальный материал «поддержки», способный к растворению в составах на водной основе. В документах компании «Stratasys Inc.» технология удаления «поддержек» растворением называется WaterWorks™. В качестве материала растворимых «поддержек» используются термопластичные акриловые сополимеры, поставляемые под торговыми названиями «SR-100», «SR-30», «P400 Soluble Support» и др. Растворимые «поддержки» используются для строительных материалов на основе ABS-пластика и поликарбоната в профессиональных установках аддитивного производства.

Для растворения «поддержек» используется водный раствор гидроксида натрия. Растворение производится в специальной емкости, оснащенной подогревом растворителя до температуры около

70 °С и системой циркуляции растворителя или возбуждения ультразвуковых колебаний. Промышленностью выпускаются установки для удаления «поддержек» по технологии WaterWorks™. Так, компания «Stratasys Inc.» поставляет установки для растворения «поддержек» серии SST Station™ и WaveWash™, а компания «PM3 Technologies Inc.» (США) – серии CleanStation® SRST™ (рис. 3.67).

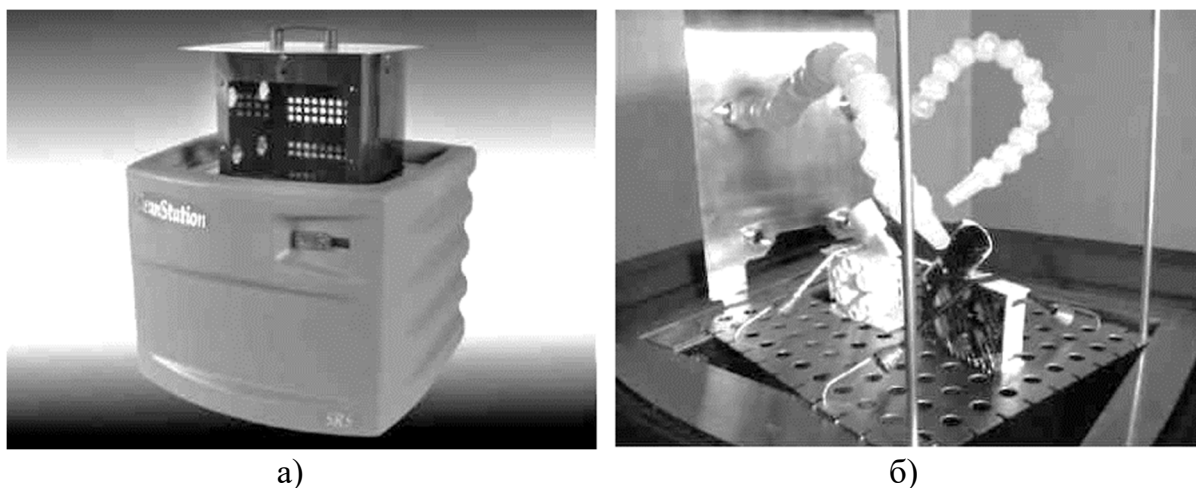


Рис. 3.67. Установка для растворения «поддержек» CleanStation® SRST™ DT3 («PM3 Technologies Inc.»): а – внешний вид; б – подставка с очищенным (слева) и неочищенным (справа) изделием

### ***3.4.5. Материалы для процесса моделирования методом послойного наплавления***

Материалы для FDM-оборудования поставляются в виде катушек, картриджей и кассет (рис. 3.68).

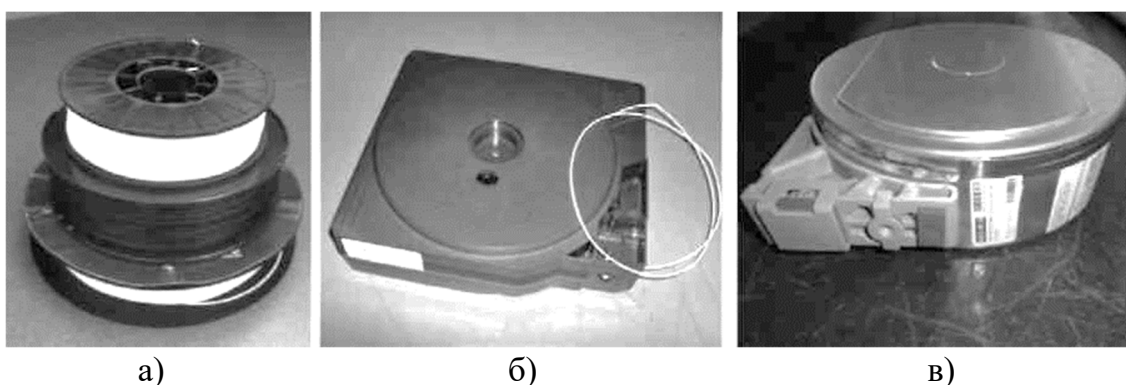


Рис. 3.68. Формы поставки материалов FDM: а – катушки; б – картридж; в – кассета

Пластик – один из самых востребованных расходных материалов для установок аддитивного производства на основе FDM-технологии. Ассортимент термопластиков и композитов исключительно разнообразен и позволяет выбрать исходя из поставленных задач наиболее подходящие по физико-механическим свойствам материалы.

**Преимущества пластиков:**

- ✓ широкий диапазон применений;
- ✓ разнообразие цветов и фактур материала;
- ✓ легкость механической обработки;
- ✓ удобство в использовании;
- ✓ гибкая структура материала;
- ✓ возможность печати крупных цельных изделий;
- ✓ относительно невысокая стоимость.

**Основные виды пластиков:**

- ✓ полилактид (PLA, ПЛА);
- ✓ акрилонитрилбутадиенстирол (ABS, АБС);
- ✓ поливиниловый спирт (PVA, ПВА);
- ✓ нейлон (Nylon);
- ✓ поликарбонат (PC, ПК);
- ✓ полиэтилен высокой плотности (HDPE, ПНД);
- ✓ полипропилен (PP, ПП);
- ✓ поликапролактон (PCL);
- ✓ полифенилсульфон (PPSU);
- ✓ полиметилметакрилат (Acrylic, оргстекло, акрил, ПММА);
- ✓ полиэтилентерефталат (PET, ПЭТ);
- ✓ композитные материалы.

**Полилактид (PLA, ПЛА).** Полилактид – один из наиболее широко используемых термопластиков, что обуславливается сразу несколькими факторами. Начнем с того, что PLA известен своей экологичностью. Этот материал является полимером молочной кислоты, что делает PLA-пластик полностью биоразлагаемым. Сырьем для производства полилактида служат кукуруза и сахарный тростник. В то же время экологичность полилактида обуславливает его недолговечность. Пластик легко впитывает воду и относительно мягок. Как правило, модели из PLA-пластика не предназначаются для функцио-

нального использования, а служат в качестве дизайнерских моделей, сувениров и игрушек.

Среди немногих практических промышленных применений полилактида можно отметить производство упаковки для пищевых продуктов, контейнеров для лекарственных препаратов и хирургических нитей, а также использование в подшипниках, не несущих высокой механической нагрузки (например, в моделировании), что возможно благодаря отличному коэффициенту скольжения материала. Одним из наиболее важных факторов для применения в 3D-печати служит низкая температура плавления – всего 170 – 180 °С, что способствует относительно низкому расходу электроэнергии и использованию недорогих сопел из латуни и алюминия. Как правило, экструзия производится в диапазоне температур 160 – 170 °С. В то же время PLA-пластик достаточно медленно застывает (температура стеклования составляет 50 °С), что следует учитывать при выборе 3D-принтера.

Оптимальным вариантом представляется устройство с корпусом открытого типа, подогреваемой рабочей платформой (во избежание деформаций моделей большого размера) и желательно дополнительными вентиляторами для охлаждения свежих слоев модели. PLA-пластик обладает низкой усадкой, т. е. потерей объема при охлаждении, что способствует предотвращению деформаций. Тем не менее усадка имеет кумулятивный эффект при увеличении габаритов печатаемых моделей. В последнем случае может потребоваться подогрев рабочей платформы для равномерного охлаждения печатаемых объектов. Стоимость PLA-пластика относительно невелика, что добавляет популярности этому материалу.

#### **Преимущества:**

- ✓ высокое качество отпечатков (более детализованные, гладкие);
- ✓ относительно высокий коэффициент вязкости;
- ✓ нетоксичен при нагревании, не загрязняет окружающую среду;
- ✓ относительно высокий коэффициент скольжения;
- ✓ практически нулевая усадка готового изделия, не более 1 %;
- ✓ не растворим в спирте и воде.

#### **Недостатки:**

- ✓ относительно низкая прочность;
- ✓ гигроскопичность;

- ✓ деформируется при незначительных усилиях, при высоких температурах воздуха (например, 30 – 50 °С);
- ✓ нестабильность физических свойств в процессе хранения в обычных атмосферных условиях ввиду накопления влаги;
- ✓ может быть серьезно поврежден при механической обработке, по сравнению с ABS-пластиком хуже поддается шлифовке;
- ✓ плохо растворяется в ацетоне.

**Акрилонитрилбутадиенстирол (ABS, АБС).** ABS-пластик, пожалуй, самый популярный термопластик из используемых в 3D-печати, но не самый распространенный. Такое противоречие объясняется определенными трудностями технического характера, возникающими при печати ABS. Желание умельцев использовать ABS обуславливается отличными механическими свойствами, долговечностью и низкой стоимостью этого материала. В промышленности ABS-пластик уже получает широкое применение: производство деталей автомобилей, корпусов различных устройств, контейнеров, сувениров, различных бытовых аксессуаров и пр. ABS-пластик устойчив к влаге, кислотам и маслу, имеет достаточно высокие показатели термостойкости – 90 – 110 °С. К сожалению, некоторые виды материала разрушаются под воздействием прямого солнечного света, что несколько ограничивает применение. В то же время ABS-пластик легко поддается окраске, что позволяет наносить защитные покрытия на немеханические элементы.

Несмотря на относительно высокую температуру стеклования (100 °С), ABS-пластик имеет относительно невысокую температуру плавления. Ввиду аморфности материала ABS-пластик не имеет точки плавления как таковой, но приемлемой температурой для экструзии считается 180 °С, что на одном уровне с вышеописанным PLA-пластиком. Более низкий разброс температур между экструзией и стеклованием способствует более быстрому застыванию ABS-пластика по сравнению с PLA-пластиком. Основным минусом ABS-пластика можно считать высокую степень усадки при охлаждении – материал может потерять до 0,8 % объема. Этот эффект может привести к значительным деформациям модели, закручиванию первых слоев и растрескиванию.

Для борьбы с этими неприятными явлениями используются два основных решения. Во-первых, применяются подогреваемые рабочие платформы, способствующие снижению градиента температур между

нижними и верхними слоями модели. Во-вторых, 3D-принтеры для печати ABS-пластиком зачастую используют закрытые корпуса и регулировку фоновой температуры рабочей камеры. Это позволяет поддерживать температуру нанесенных слоев на отметке чуть ниже порога стеклования, снижая степень усадки. Полное охлаждение производится после получения готовой модели. Относительно низкая «липучесть» ABS-пластика может потребовать дополнительных средств для схватывания с рабочей поверхностью, таких как клейкая лента, полиимидная пленка или нанесение раствора ABS-пластика в ацетоне на платформу непосредственно перед печатью.

В то время как при комнатной температуре ABS не представляет угрозы здоровью, при нагревании пластика выделяются пары акрилонитрила – ядовитого соединения, способного вызвать раздражение слизистых оболочек и отравление. Хотя объемы производимого акрилонитрила при маломасштабной печати незначительны, рекомендуется печатать в хорошо проветриваемых помещениях или предусмотреть вытяжку. Не рекомендуется использовать ABS-пластик для производства пищевых контейнеров и посуды (особенно для хранения горячей пищи или алкогольных напитков) или игрушек для маленьких детей. Хорошая растворимость ABS-пластика в ацетоне весьма полезна, так как позволяет производить большие модели по частям с последующим склеиванием, что значительно расширяет возможности недорогих настольных принтеров.

**Преимущества:**

- ✓ устойчивость к влаге;
- ✓ прочность;
- ✓ невысокая цена.

**Недостатки:**

- ✓ высокая усадка;
- ✓ низкая гибкость;
- ✓ слабая адгезия между слоями;
- ✓ высокая температура для печати;
- ✓ деформируется при охлаждении;
- ✓ рекомендуется платформа с подогревом;
- ✓ токсичен.

**Поливиниловый спирт (PVA, ПВА).** Поливиниловый спирт – материал с уникальными свойствами и особым применением. Главной осо-



бенностью PVA является его водорастворимость. 3D-принтеры, оснащенные двойными экструдерами, имеют возможность печати моделей с опорными структурами из PVA. По завершении печати опоры могут быть растворены в воде, оставляя готовую модель, не требующую механической или химической обработки неровностей. Аналогично PVA можно применять для создания водорастворимых мастер-моделей для литейных форм и самих литейных форм. Механические свойства PVA достаточно интересны. При низкой влажности пластик обладает высокой прочностью на разрыв. При повышении влажности уменьшается прочность, но возрастает эластичность. Температура экструзии составляет 160 – 175 °С, что позволяет использовать PVA в принтерах, предназначенных для печати ABS- и PLA-пластиками. Так как материал легко впитывает влагу, рекомендуется хранение PVA-пластика в сухой упаковке и при необходимости просушка перед использованием. Сушку можно производить в гончарной печи или обыкновенной духовке. Как правило, просушка стандартных катушек занимает 6 – 8 ч при температуре 60 – 80 °С. Превышение температуры в 220 °С приведет к разложению пластика, что следует учитывать при печати.

#### **Преимущества:**

- ✓ не дает усадку при печати;
- ✓ не токсичен;
- ✓ твердый, прочный;
- ✓ имеет широкий диапазон применений;
- ✓ биоразлагаемый;
- ✓ высокая адгезия;
- ✓ не требует постоянного подогрева;
- ✓ не боится сквозняков при печати.

#### **Недостатки:**

- ✓ низкая температура размягчения;
- ✓ легко теряет форму;
- ✓ под воздействием воздуха и УФ-излучения теряет свойства;
- ✓ небольшой температурный диапазон использования;
- ✓ трудная механическая обработка;
- ✓ гигроскопичен.

**Нейлон (Nylon).** Нейлон привлекателен своей высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения. Так, нейлон зача-

стую используется для покрытия трущихся деталей, что повышает их эксплуатационные качества и зачастую позволяет функционировать без смазки. Вслед за широким применением нейлона в промышленности материалом заинтересовались и в сфере аддитивного производства. Попытки печатать нейлоном предпринимались практически с первых дней появления FDM-технологии.

В реальности существует несколько видов нейлона, производимых разными методами и имеющих несколько отличающиеся характеристики. Наиболее известным следует считать нейлон-66, созданный американской компанией DuPont в 1935 г. Вторым наиболее популярным вариантом является нейлон-6, разработанный компанией BASF в обход патента DuPont. Эти два варианта очень схожи. С точки зрения 3D-печати основным различием выступает температура плавления: нейлон-6 плавится при температуре 220 °С, а нейлон-66 – при 265 °С. Многие любители предпочитают использовать нейлоновые нити, доступные в широкой продаже, например проволока для садовых триммеров. Диаметр таких материалов зачастую соответствует диаметру стандартных FDM-материалов, что делает их использование заманчивым. В то же время подобные продукты, как правило, не являются чистым нейлоном. В случае с прутками для триммеров материал состоит из нейлона и стеклопластика для оптимального сочетания гибкости и жесткости. Стеклопластик обладает высокой температурой плавления, в связи с чем печать подобными материалами чревата высоким износом сопла и образованием пробок.

В последнее время предпринимаются попытки коммерческой разработки печатных материалов на основе нейлона специально для FDM-устройств, в том числе Nylon-PA6 и Taulman 680. Указанные марки подлежат экструзии при температуре 230 – 260 °С. Так как нейлон легко впитывает влагу, расходный материал следует хранить в вакуумной упаковке или как минимум в контейнере с водоабсорбирующими материалами. Признаком чрезмерно влажного материала станет пар, исходящий из сопла во время печати, что не опасно, но пар может ухудшить качество модели.

При печати нейлоном не рекомендуется применять полиимидное покрытие рабочего стола, так как эти два материала сплавляются друг с другом. В качестве покрытия можно выбрать липкую ленту с восковой пропиткой (masking tape). Использование подогреваемой

платформы поможет снизить возможность деформации модели аналогично печати ABS-пластиком. В связи с низким коэффициентом трения нейлона следует пользоваться экструдерами с шипованными протягивающими механизмами. Слои нейлона прекрасно схватываются, что минимизирует вероятность расслоения моделей. Нейлон плохо поддается склеиванию, поэтому печать крупных моделей из составных частей затруднительна. Как вариант возможна сплавка частей. Так как при нагревании нейлона возможно выделение токсичных паров, рекомендуется производить печать в хорошо вентилируемых помещениях или с использованием вытяжки.

**Преимущества:**

- ✓ прочность;
- ✓ высокая гибкость;
- ✓ химическая стойкость;
- ✓ температурный диапазон печати 220 – 260 °С;
- ✓ нагрев платформы 50 – 100 °С;
- ✓ высокая адгезия;
- ✓ высокое скольжение;
- ✓ термостойкость.

**Недостатки:**

- ✓ сложность печати;
- ✓ высокая усадка;
- ✓ гигроскопичен;
- ✓ во время печати не должно быть сквозняков;
- ✓ усадка во время охлаждения.

**Поликарбонат (РС, ПК).** Поликарбонаты привлекательны за счет своей высокой прочности и ударной вязкости, а также устойчивости к высоким и низким температурам. Стоит отметить потенциальный риск для здоровья при печати: в качестве сырья зачастую используется токсичное и потенциально канцерогенное соединение бисфенол А. Остаточный бисфенол А может содержаться в готовых изделиях из поликарбоната и испаряться при нагревании, в связи с чем рекомендуется производить печать в хорошо вентилируемых помещениях. Температура экструзии зависит от скорости печати во избежание растрескивания, но минимальной температурой при скорости 30 мм/с можно считать 265 °С. При печати рекомендуется применение полиимидной пленки для лучшего схватывания с поверхностью

рабочего стола. Высокая склонность поликарбоната к деформации требует использования подогреваемой платформы и по мере возможности закрытого корпуса с подогревом рабочей камеры. Поликарбонат обладает высокой гигроскопичностью (легко поглощает влагу), что требует хранения материала в сухих условиях во избежание образования пузырьков в наносимых слоях. В случае длительной печати во влажном климате может потребоваться хранение даже рабочей катушки во влагозащитном контейнере.

**Полиэтилен высокой плотности (HDPE, ПНД).** Пожалуй, наиболее распространенный пластик в мире – полиэтилен относительно редок среди 3D-печатных материалов. Причиной тому служат сложности при послойном изготовлении моделей. Полиэтилен легко плавится (130 – 145 °С) и быстро застывает (100 – 120 °С), вследствие чего наносимые слои зачастую не успевают схватываться. Кроме того, полиэтилен отличается высокой усадкой, что провоцирует закрутку первых слоев и деформацию моделей в целом при неравномерном застывании. Печать полиэтиленом требует использования подогреваемой платформы и рабочей камеры с аккуратной регулировкой температурного режима для замедления остывания нанесенных слоев. Кроме того, потребуется производить печать на высокой скорости. Трудности в использовании компенсируются дешевизной и общедоступностью этого материала.

В последнее время были разработаны несколько устройств для переработки пластиковых отходов из ПНД (бутылок, пищевой упаковки и пр.) в стандартные нити для печати на FDM-принтерах. Примерами служат FilaBot и RecycleBot. За счет простоты конструкции устройства RecycleBot зачастую собираются силами 3D-умельцев. При плавлении полиэтилена происходит эмиссия паров вредных веществ, поэтому рекомендуется производить печать в хорошо вентилируемых помещениях.

**Полипропилен (PP, ПП).** Полипропилен – широко распространенный пластик, применяемый в производстве упаковочных материалов, посуды, шприцов, труб и пр. Материал имеет низкую удельную массу, нетоксичен, обладает хорошей химической стойкостью, устойчив к влаге и износу и достаточно дешев. Среди недостатков полипропилена можно отметить уязвимость к температурам ниже –5 °С и к воздействию прямого солнечного света. Главной трудностью при

печати полипропиленом является высокая усадка материала при охлаждении – до 2,4 %. Для сравнения, усадка популярного, но уже достаточно проблематичного ABS-пластика достигает 0,8 %. Несмотря на то, что полипропилен хорошо прилипает к холодным поверхностям, рекомендуется производить печать на подогреваемой платформе во избежание деформации моделей. Минимальная рекомендуемая температура экструзии составляет 220 °С. Полипропиленовые нити для печати предлагаются на продажу компаниями Orbi-Tech, German RepRap, Qingdao TSD Plastic. Компания Stratasys разработала имитатор полипропилена, оптимизированный для 3D-печати, под названием Endur.

**Поликапролактон (PCL).** Поликапролактон (он же Hand Moldable Plastic, Mold-Your-Own Grips, InstaMorph, Shapelock, Friendly Plastic, Polymorph, полиморфус, экоформакс) – биоразлагаемый полиэстер, отличающийся чрезвычайно низкой температурой плавления порядка 60 °С. На практике это свойство создает определенные проблемы при 3D-печати, так как далеко не все 3D-принтеры можно настроить для работы при столь низких температурах. Нагревание поликапролактона до привычных экструзионных температур (около 200 °С) вызывает потерю механических свойств и может привести к поломке экструдера.

Поликапролактон нетоксичен, что обуславливает его применение в медицинской отрасли, и биоразлагаем. При попадании в организм поликапролактон распадается, что делает печать этим материалом безопасной. Благодаря низкой температуре плавления отсутствует опасность ожогов при прикосновении к свежим моделям. Высокая пластичность материала делает возможным многократное использование. Поликапролактон малоприспособен для создания функциональных механических моделей ввиду вязкости (температура стеклования составляет –60 °С) и низкой теплостойкости (температура плавления 60 °С). С другой стороны, этот материал прекрасно подходит для производства макетов и пищевых контейнеров, он легко слипается с поверхностью даже холодного рабочего стола и легко поддается окраске.

**Полифенилсульфон (PPSU).** Полифенилсульфон – высокопрочный термопластик, активно применяемый в авиационной промышленности. Материал имеет прекрасную химическую и тепловую

устойчивость и практически не горит. Полифенилсульфон биологически инертен, что позволяет использовать его для производства посуды и пищевых контейнеров. Диапазон эксплуатационных температур составляет от  $-50$  до  $180$  °С. Пластик устойчив к воздействию растворителей и горюче-смазочных материалов. При всех своих достоинствах полифенилсульфон редко используется в 3D-печати ввиду высокой температуры плавления, достигающей  $370$  °С. Такие температуры экструзии не под силу большинству настольных принтеров, хотя теоретически печать возможна при использовании керамических сопел. В настоящее время единственным активным пользователем материала является компания Stratasys, предлагающая промышленные установки Fortus.

**Полиметилметакрилат (Acrylic, оргстекло, акрил, ПММА).** Полиметилметакрилат – это всем известное органическое стекло. Материал прочен, влагоустойчив, экологичен, легко поддается склеиванию, достаточно пластичен и устойчив к воздействию прямого солнечного света. К сожалению, акрил плохо подходит для FDM-печати в силу ряда причин. Акрил плохо хранится в виде катушек с нитью, так как постоянное механическое напряжение приводит к постепенному разрушению материала. Во избежание образования пузырьков разрешение печати должно быть высоким – с точностью, практически недоступной для домашних принтеров. Быстрое застывание акрила требует жесткого климатического контроля рабочей камеры и высокой скорости печати. Опять-таки, показатели скорости печати FDM-принтеров обратно пропорциональны разрешению печати, что усугубляет проблему. Тем не менее попытки печати акрилом предпринимаются, а некоторые из них дают относительно положительные результаты. Однако при создании достаточно прочных моделей избежать образования пузырьков и достигнуть привычной прозрачности материала пока не удастся.

На данный момент наилучшие результаты с акрилом показывает другая технология печати – многоструйное моделирование (MJM) от компании 3D Systems. В данном случае используется фотополимерный вариант акрила. Значительных успехов достигла и компания Stratasys, использующая собственный фотополимерный имитатор акрила VeroClear на принтерах марки Objet Eden. Остается надеяться, что высокий спрос на акрил приведет к появлению композитных ма-

териалов на основе полиметилметакрилата, предназначенных специально для FDM-печати.

**Полиэтилентерефталат (PET, ПЭТ).** Полиэтилентерефталат – материал, используемый для производства пластиковых бутылок и другой пищевой и медицинской тары, так как имеет высокую химическую устойчивость к кислотам, щелочам и органическим растворителям. Физические свойства ПЭТ также впечатляют высокой износостойкостью и терпимостью к широкому диапазону температур: от –40 до 75 °С. Кроме всего прочего, материал легко поддается механической обработке. Печать с использованием ПЭТ несколько проблематична ввиду сравнительно высокой температуры плавления, достигающей 260 °С, и значительной усадки при остывании, составляющей до 2 %. Использование ПЭТ в качестве расходного материала требует примерно тех же условий, что и печать ABS-пластиком. Для достижения прозрачности моделей необходимо быстрое охлаждение при прохождении порога стеклования, составляющего 70 – 80 °С. Материал стал предметом внимания «3D-умельцев», применяющих использованную тару в качестве сырья для бытового производства расходных материалов для 3D-печати. Для изготовления нитей предусматривают такие перерабатывающие устройства, как FilaBot или RecycleBot.

**Преимущества:**

- ✓ геометрическая точность при печати;
- ✓ отсутствие усадки;
- ✓ устойчивость к атмосферным воздействиям;
- ✓ универсальность применения;
- ✓ хорошее скольжение;
- ✓ противоударные свойства;
- ✓ высокая адгезия;
- ✓ не токсичен, можно печатать изделия, предназначенные для контакта с пищей.

**Недостатки:**

- ✓ прочность и температура размягчения ниже, чем у ABS;
- ✓ в процессе работы на изделии остается большое количество лишнего материала.

**Ударопрочный полистирол (HIPS).** Ударопрочный полистирол широко используется в промышленности для производства раз-

личных бытовых изделий, строительных материалов, одноразовой посуды, игрушек, медицинских инструментов и пр. При 3D-печати полистирол демонстрирует физические свойства, весьма схожие с известным ABS-пластиком, что делает этот материал все более популярным среди «3D-умельцев». Наиболее привлекательной особенностью полистирола следует назвать отличие от ABS-пластика в отношении химических свойств: полистирол легко поддается органическому растворителю лимонену. Так как лимонен не имеет эффекта на ABS-пластик, возможно использование полистирола в качестве материала для построения растворимых поддерживающих структур, что исключительно полезно при построении сложных переплетенных моделей с внутренними опорами. В сравнении с удобным водорастворимым поливиниловым спиртом (PVA-пластиком) полистирол выгодно отличается относительно низкой стоимостью и устойчивостью к влажному климату, затрудняющему работу с PVA-пластиком. Стоит иметь в виду, что некоторые производители ABS-пластика подмешивают в свои расходные материалы несколько более дешевый полистирол. Соответственно модели из таких материалов могут раствориться в лимонене вместе с опорными структурами. При нагревании полистирола до температуры экструзии возможно выделение токсичных испарений, в связи с чем рекомендуется осуществлять печать в хорошо проветриваемых помещениях.

**Преимущества:**

- ✓ высокая прочность;
- ✓ хорошая растворимость.

**Недостатки:**

- ✓ безопасен при контакте с пищей, но в составе имеет стирол, который при нагревании токсичен;
- ✓ низкая гибкость;
- ✓ общий температурный диапазон печати 210 – 250 °С;
- ✓ усадка при охлаждении;
- ✓ нагрев платформы до 50 – 100 °С;
- ✓ умеренная сложность печати;
- ✓ плохая адгезия.

Номенклатура материалов, выпускаемых фирмой «REC» (Россия), с указанием их физико-механических характеристик приведена в табл. 3.3.



Таблица 3.3

## Номенклатура материалов фирмы REC (Россия)

| Вид пластика    | Температура сопла, °С | Температура стола, °С | Минимальный диаметр сопла, мм | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Температура размягчения, °С | Прочность на изгиб, МПа | Максимальная нагрузка на изгиб, Н |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| PLA             | 200 – 220             | 0 – 60                | 0,1                           | 1,25                         | ~ 50                        | 94,2                    | 154                               |
| ABS             | 240 – 270             | 90 – 110              | 0,1                           | 1,05                         | ~ 103                       | 65,4                    | 103                               |
| HIPS            | 220 – 235             | 90 – 110              | 0,1                           | 1,03                         | ~ 96                        | 37,6                    | 62                                |
| Flex (TPI)      | 220 – 240             | 90 – 110              | 0,4                           | 1,1                          | ~ 110                       | 5,3                     | 8                                 |
| Rubber (SEBS)   | 225 – 245             | 90 – 110              | 0,4                           | 0,95                         | ~ 80                        | 3,4                     | 5                                 |
| Relax (PETG)    | 215 – 245             | 20 – 60               | 0,1                           | 1,30                         | ~ 80                        | 76,1                    | 120                               |
| Eternal (ASA)   | 225 – 240             | 80 – 110              | 0,1                           | 1,08                         | ~ 100                       | 69,5                    | 114                               |
| Easy Flex (TPU) | 215 – 235             | 30 – 60               | 0,4                           | 1,15                         | ~ 60                        | 3,5                     | 7                                 |
| Cast (PMMA)     | 225 – 245             | 90 – 110              | 0,2                           | 1,18                         | ~ 113                       | 6,4                     | 98                                |
| Friction (PA)   | 250 – 270             | 100 – 110             | 0,4                           | 1,05                         | ~ 202                       | –                       | –                                 |
| PP              | 210 – 230             | 40 – 60               | 0,1                           | 0,90                         | ~ 115                       | –                       | –                                 |

|  |  |   |
|--|--|---|
| <br>ABS | <br>Easy Flex | <br>Rubber |
|--|--|---|

**Композитные материалы на основе PLA-пластика.** Композитные материалы – это многокомпонентные материалы, состоящие из полимерной основы (матрицы), армированной наполнителями (5 – 40 %) (рис. 3.69).



Рис. 3.69. Структура композитных наполнителей PLA-пластика

**PLA-пластик с металлическими наполнителями.** Металлы привлекают сторонников аддитивного производства с момента появления технологий 3D-печати. К сожалению, печать чистыми металлами и сплавами вызывает массу трудностей, непреодолимых для большинства методов 3D-печати. Полностью функциональные металлические изделия можно произвести только с помощью таких технологий, как SLS, DLMS или EBM, требующих использования промышленных установок, чья стоимость исчисляется сотнями тысяч долларов. В то же время имитаторы металлов успешно используются в струйной 3D-печати (3DP), где формирование изделий происходит

из металлических порошков, частицы которых скрепляются наносимым связующим материалом. В FDM-печати металлические имитаторы – явление достаточно новое. Интересным примером служит BronzeFill – фактически прозрачный PLA-пластик с наполнителем из микрочастиц бронзы. Материал, в настоящее время проходящий бета-тестирование, должен доказать пригодность для использования в любых принтерах, предназначенных для работы с полилактидом. Готовые изделия легко поддаются полировке, достигая высокого внешнего сходства с цельнометаллическими изделиями. В то же время стоит учитывать, что связующим элементом материала служит термопластик с соответствующими механическими и температурными ограничениями.

**PLA-пластик с древесными наполнителями.** LAYWOO-D3 – недавняя разработка, предназначенная для печати моделей, напоминающих деревянные изделия. Материал на 40 % состоит из натуральных древесных опилок микроскопического размера и на 60 % – из связующего полимера. LAYWOO-D3 весьма прост в обращении, будучи практически неподвержен деформациям и не требователен к использованию подогреваемой платформы. Согласно производителям полимер нетоксичен и полностью безопасен. Уникальные свойства материала позволяют добиваться различных визуальных результатов при печати с разными температурами сопла. Диапазон рабочих температур составляет 180 – 250 °С. По мере увеличения температуры экструзии оттенок материала становится прогрессивно более темным, позволяя имитировать разные сорта древесины или годовые кольца. Готовые модели прекрасно поддаются механической обработке: шлифовке, сверлению и пр. Кроме того, изделия легко окрашиваются, а неокрашенные модели даже имеют характерный древесный запах. К сожалению, стоимость материала почти в четыре раза превышает цену на такие популярные материалы, как PLA- и ABS-пластики. По мере прогнозируемого роста популярности материал должен стать более доступным. В настоящее время ведется разработка и тестирование альтернативных материалов, таких как BambooFill голландской компании ColorFabb.

Примеры изделий из композитных материалов на основе PLA-пластика представлены на рис. 3.70.



Рис. 3.70. Примеры изделий из композитных материалов на основе PLA-пластика

### 3.4.6. Альтернативные FDM-методы послойной экструзии

К дополнительным преимуществам методов послойной экструзии следует отнести их техническую простоту в сравнении с прочими способами послойного синтеза. Это обусловлено тем, что в послойной экструзии не требуется наличия особых источников энергетического воздействия, таких как лазерное излучение или ультразвук, и механической обработки, предъявляющей высокие требования к жесткости узлов оборудования. Это приводит к активным попыткам создания альтернативных FDM-методов, в том числе открытых технологий (Open Source), разрабатываемых энтузиастами и доступных всем желающим.

Альтернативные FDM-методы послойной экструзии чаще всего реализуются путем использования оригинальных механизмов подачи материала (рис. 3.71).

Помимо механизма с роликами применяют винтовые (рис. 3.71, а) и шнековые (рис. 3.71, б) механизмы экструзии, а также поршневые механизмы (рис. 3.71, в) и системы подачи давлением газов (рис. 3.71, г). Строительный материал при этом может быть использован как в форме нитей, так и в виде порошка, пеллет, гелей, паст и т. д.

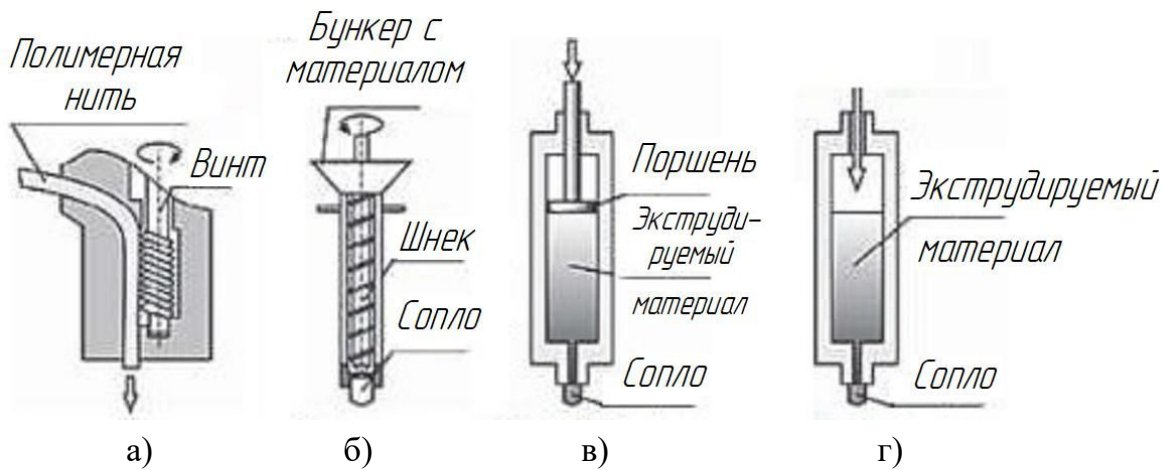


Рис. 3.71. Альтернативные FDM-методы экструзии материала: а – подача полимерной нити винтовым механизмом; б – подача материала шнеком; в – подача материала давлением поршня; г – подача материала давлением газа

Технология Fab@Home, разработанная Х. Липсоном в Корнеллском университете (США), является открытой: документация на нее, включая чертежи узлов установки и инструкции по ее самостоятельному изготовлению, а также программное обеспечение, доступны всем желающим. Установки в технологии Fab@Home называют фабберами (fabber). Фабберы (рис. 3.72) представляют собой трехкоординатные позиционирующие устройства: координата  $Z$  обеспечивает перемещение платформы построения, на которой формируются изделия, координаты  $X$  и  $Y$  обеспечивают перемещение каретки, на которой устанавливаются экструдерные головки (экструдеры).

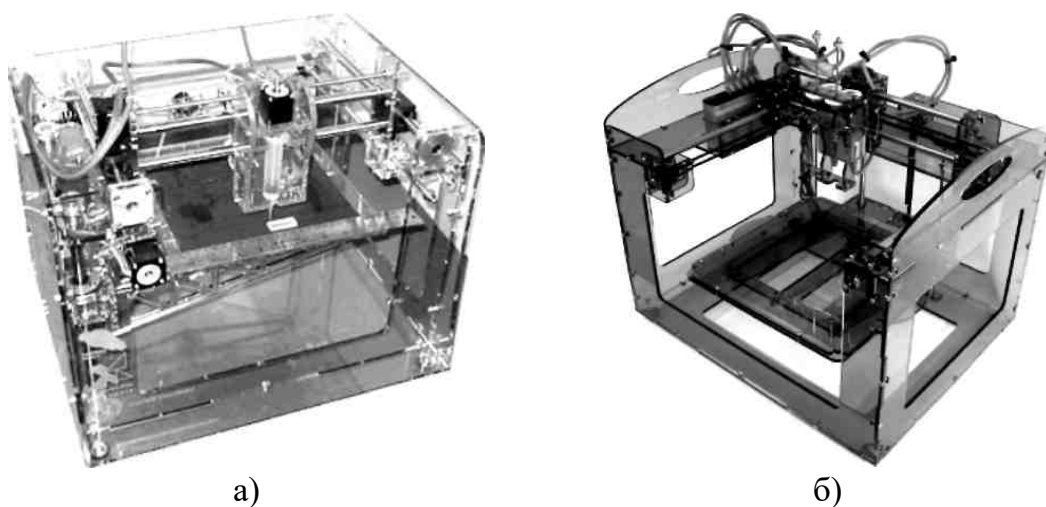


Рис. 3.72. Фабберы (Fab@Home): а – Model I; б – Model II

В Fab@Home реализовано несколько различных механизмов экструзии материала. Основным является механизм экструзии посредством давления поршня. Головка, работающая по такому принципу, называется шприцем (syringe tool, рис. 3.73, а) и предназначена для экструзии пастообразных и других текучих материалов.

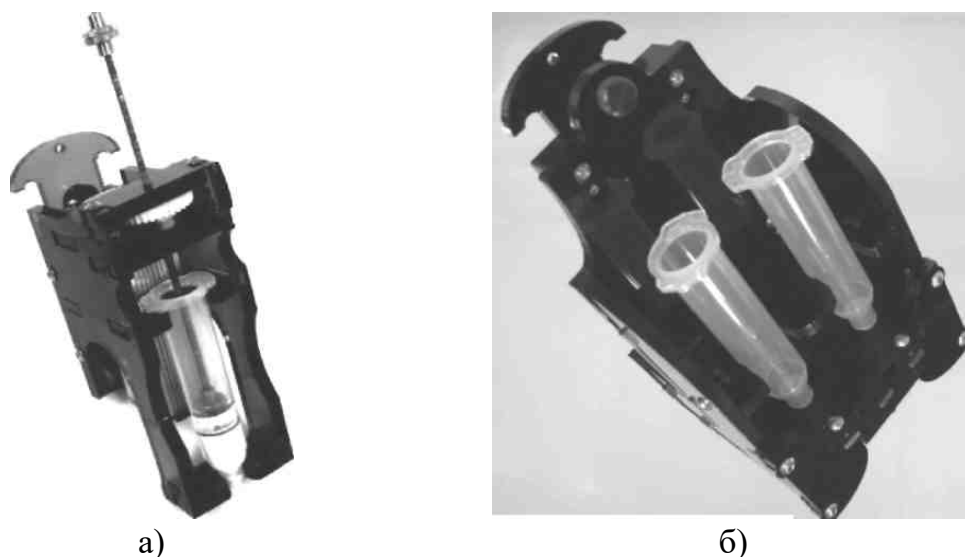


Рис. 3.73. Головки «Fab@Home»: а – типа «шприц»; б – двоянная типа «форсунка»

При наличии системы подогрева может использоваться для термoplastов. Точность размещения материала такой головкой определяется диаметром отверстия сопла, обеспечением требуемого потока, истекающего из сопла, и зазором между соплом и формируемой поверхностью. Также используются головки типа «форсунка» (valve tool, рис. 3.73, б), в которых экструзия осуществляется посредством давления сжатого воздуха. Такие головки могут содержать большее количество строительного материала. В качестве материала не могут использоваться вещества, отверждающиеся на воздухе.

Строительными материалами чаще всего выступают эпоксидные смолы, силикон, гипс, глина, термoplastы и т. п. Еще одним успешным примером реализации открытой технологии послойной экструзии является деятельность сообщества «RepRap.org» [53].

В технологии Curved Layer Fused Deposition Modeling (CLFDM), разработанной в Национальном университете Сингапура совместно с Оклендским технологическим университетом (Новая Зеландия), ре-



лизован послойный синтез со слоями криволинейной формы (рис. 3.74, а).

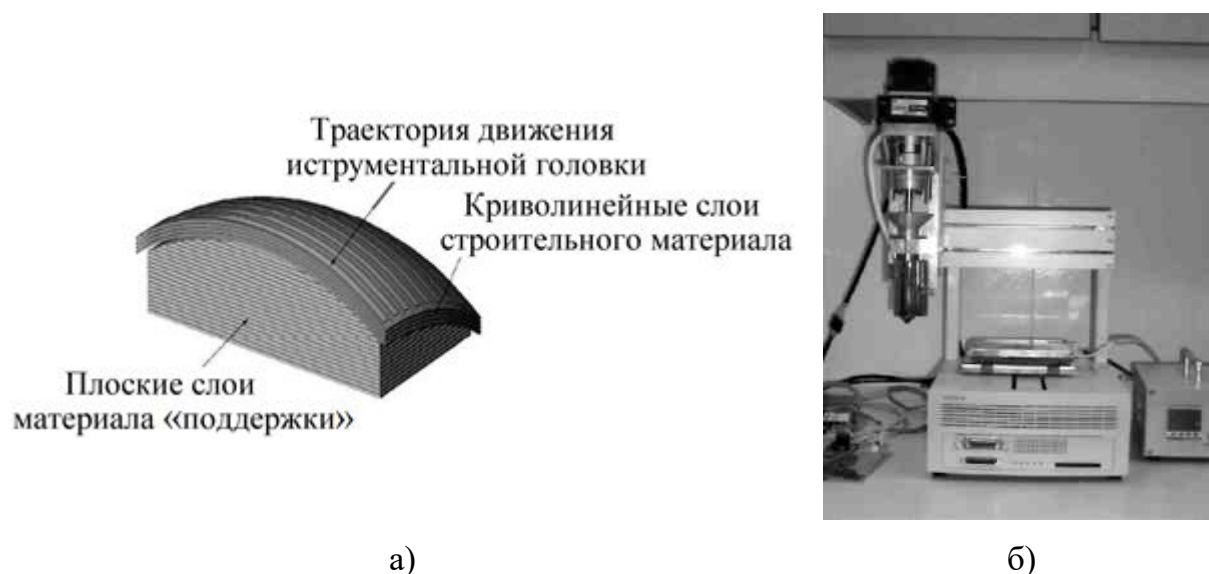


Рис. 3.74. Технология Curved Layer Fused Deposition Modeling: а – схема формирования слоев; б – установка с подачей экструдированного материала шнеком

Такой способ позволяет избежать эффекта ступенчатости при изготовлении тонкостенных криволинейных изделий. При этом изначально по традиционной схеме формируются слои материала «поддержки», а верхняя поверхность сформированного тела выступает «пьедесталом» для формирования криволинейных слоев из строительного материала.

Метод реализуется на установке Fab@Home либо на установке собственной конструкции с подачей экструдированного материала шнеком (рис. 3.74, б). В настоящее время технология CLFDM не коммерциализирована.

Особой областью использования технологий послойной экструзии является создание трехмерных подложек-носителей для биологических тканей. Такие подложки представляют собой пространственные сетки, на которых формируются биологические ткани. Подложки изготавливают из таких материалов, как титан, гидроксиапатит, коллаген и т. п. Такое разнообразие свойств требует реализации процесса как при весьма высоких температурах, так и при низких (в частности, близких к нулю для биологических материалов). Помимо того, в процессе синтеза изделия требуется обеспечение стерильности. Для ре-

шения подобных задач и изготовления других биомедицинских изделий компания «EnvisionTEC GmbH» реализовала разработанный в Германском центре исследований материалов (Фрайбург) особый вид оборудования 3D-Bioplotter™ (рис. 3.75).

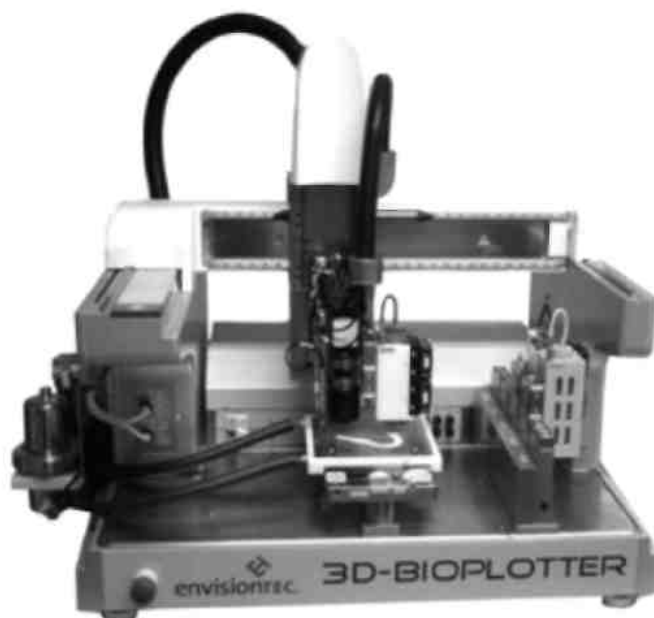


Рис. 3.75. Оборудование 3D-Bioplotter™ («EnvisionTEC GmbH», Германия)

Биоплоттер оснащен двумя головками, осуществляющими подачу материала за счет давления сжатого воздуха. Головки оснащены термостатами, и одна из них является высокотемпературной (250 °С), а другая – низкотемпературной (2 – 70 °С). Для обеспечения стерильности изготавливаемых изделий в биоплоттере применяются стерильные фильтры на подаче сжатого воздуха и УФ-лампы. Основные характеристики оборудования 3D-Bioplotter™ приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Основные характеристики оборудования 3D-Bioplotter™  
(четвертое поколение)

|                              |   |
|------------------------------|---|
| Разрешение по осям $X, Y, Z$ | 0,001 мм                                      |
| Скорость перемещения головки | 0,1 – 150 мм/с                                |
| Размеры области построения   | 150×150×140 мм                                |
| Минимальный диаметр полосы   | 0,100 мм (зависит от материала)               |
| Смена материала              | Автоматическая (до пяти различных картриджей) |
| Платформа                    | Сменная с возможностью подогрева и охлаждения |

Установка 3D-Bioplotter™ позволяет изготавливать изделия из материалов широкой номенклатуры (рис. 3.76):

✓ материалы изделий для регенерации костных тканей: гидроксиапатит, титан, трикальций фосфат, а также биodeградирующие полимеры и сополимеры: PLC, PLGA, PLLA;

✓ материалы для высвобождения лекарственных средств: биodeградирующие полимеры и сополимеры: PLC, PLGA, PLLA;

✓ материалы для изготовления мягких биологических тканей и органов: хитозан, агар, альгинат, желатин, коллаген, фибрин;

✓ материалы для концептуального моделирования: полиуретан, силикон.



Рис. 3.76. Изделия, полученные на установке 3D-Bioplotter™ («EnvisionTEC GmbH», Германия)

В процессе формирования изделий из таких материалов, как гидроксиапатит, титан и трикальций фосфат, они лишь приобретают форму, ее закрепление осуществляется спеканием при постобработке.

### 3.5. Методы послойного синтеза печатью

К методам послойного синтеза печатью относят способы аддитивной технологии, заключающиеся в нанесении строительного или связующего материала, изначально находящегося в жидкой фазе. Данные способы имеют общие черты с технологией обычной струйной печати. В частности, в них используются печатающие головки, аналогичные головкам струйных принтеров.



### *3.5.1. Синтез баллистическими частицами*

Метод синтеза баллистическими частицами Ballistic Particle Manufacturing (BPM) считается первым из разработанных способов послойного синтеза печатью. Патент на BPM был получен в 1987 г., после чего была основана компания «BPM Technology, Inc.» (США), занимавшаяся коммерциализацией разработки. Технология BPM заключается в размещении строительного материала в жидкой фазе посредством печатающих головок. После размещения строительный материал, в качестве которого используются термопластичные полимеры, затвердевает, формируя изделие. Аналогично FDM-синтез баллистическими частицами требует создания поддерживающих структур. В связи с этим в BPM обычно используется несколько головок, одна из которых предназначена для размещения материала поддержек. В качестве материала «поддержек» используется гелеобразное водорастворимое вещество – полиэтиленгликоль, который в зависимости от средней молекулярной массы может находиться как в жидком, так и гелеобразном и твердом состояниях.

Было предложено несколько различных вариантов схемы процесса, отличающихся способами позиционирования печатающих головок. Наиболее простой считается плоттерная схема по принципу, реализованному в установке Model Maker 3D Plotting (рис. 3.77).

Также применялась схема с позиционированием головок поворотом, что позволяет снизить потребность в поддерживающих структурах.

Коммерциализация технологии синтеза баллистическими частицами потерпела неудачу. С развитием технологии FDM и трехмерной печати неконкурентность BPM по производительности и свойствам формируемых изделий стала очевидной. В 1998 г. работы по технологии синтеза баллистическими частицами были свернуты.

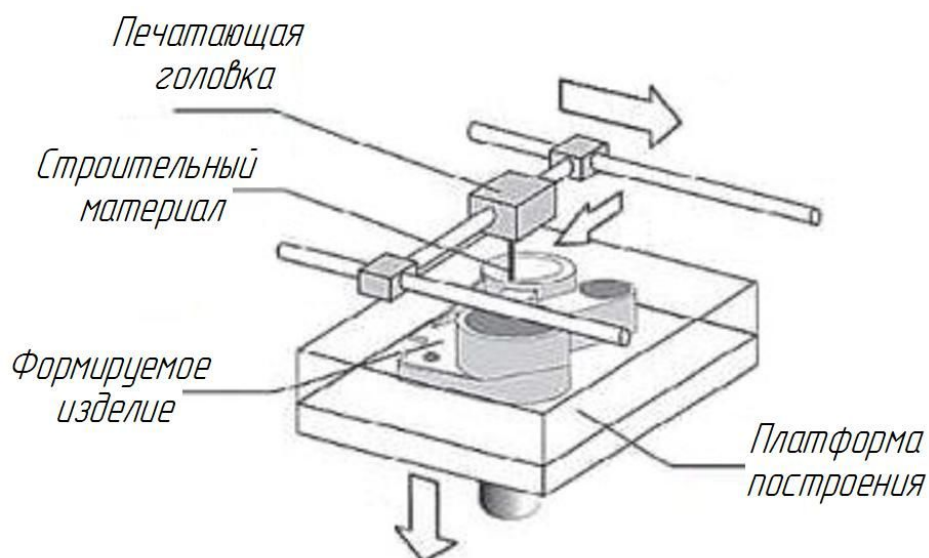


Рис. 3.77. Схема процесса синтеза баллистическими частицами

### 3.5.2. Трехмерная печать

Метод трехмерной печати (Three-Dimensional Printing, 3DP) разработан в Массачусетском технологическом институте (США) и был лицензирован различными компаниям («Z Corp.», «The Ex One Company, LLC» и др.). Сущность процесса заключается в послойном нанесении связующего на порошковую основу (рис. 3.78) и имеет общие черты с процессом СЛС. Конкретные механизмы нанесения порошка и связующего, их виды отличаются у различных производителей.

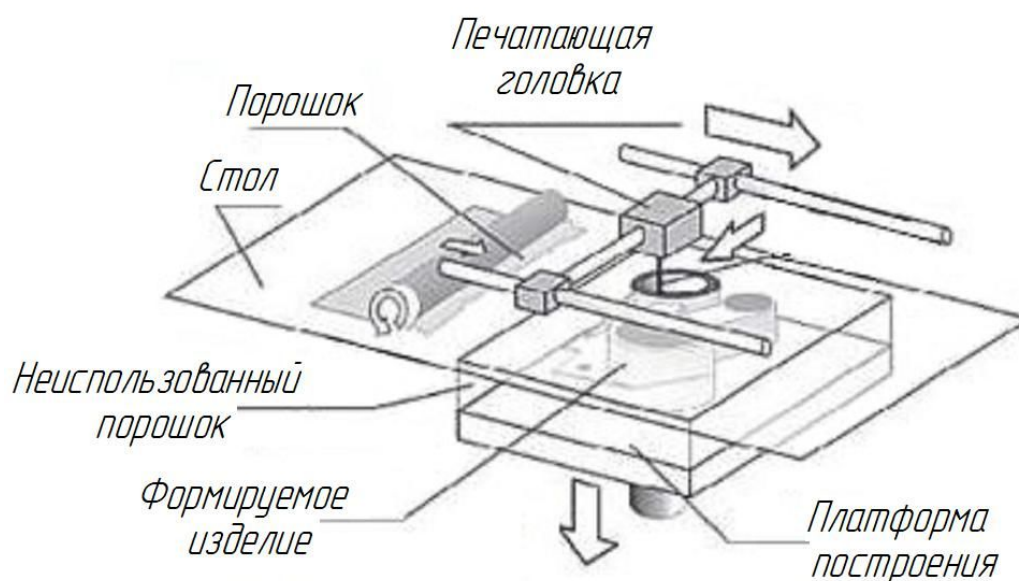


Рис. 3.78. Схема процесса трехмерной печати (3DP)

Важной особенностью процесса 3DP стала возможность получения полноцветных объемных изделий путем распыления вместе со связующим красителей. Подобно СЛС, в 3DP используется в качестве постобработки инфильтрация (пропитка) моделей различными составами. Поддерживающие структуры («поддержки») также не требуются, поскольку их роль исполняет масса несвязанного порошка.

На сегодняшний день ведущим производителем оборудования 3DP выступает компания «Z Corp., Inc.» (США), выпускающая широкий модельный ряд установок трехмерной печати ZPrinter® и материалов для прототипирования. В устройствах используются многодозовые печатающие головки, наносящие жидкое связующее на порошковый строительный материал. Внутреннее устройство аппарата приведено на рис. 3.79.

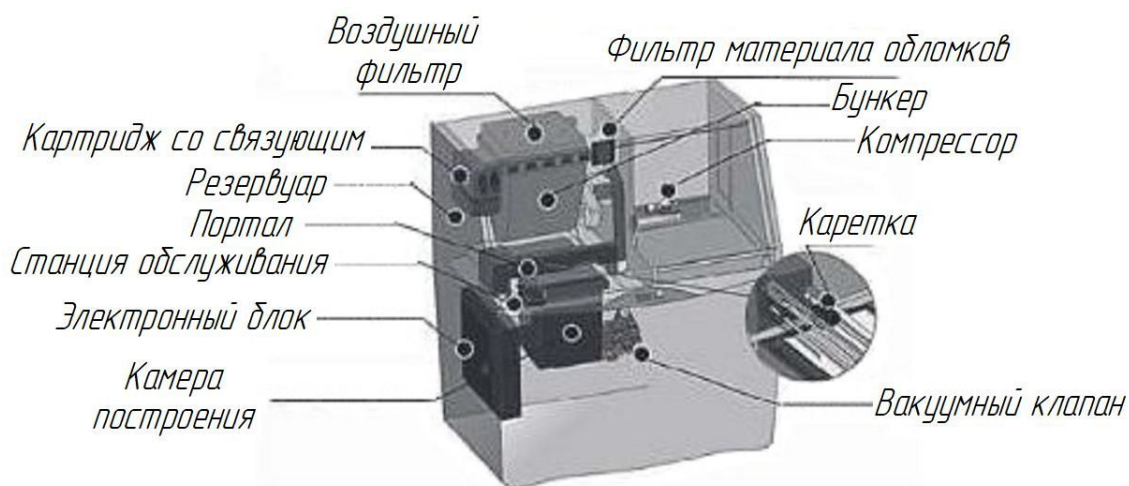


Рис. 3.79. Схема установки ZPrinter® («Z Corp., Inc.»)

Аппарат состоит из следующих основных элементов:

- ✓ воздушного фильтра (обеспечивает очистку выходящего из аппарата воздуха от частиц порошка);
- ✓ картриджа со связующим (содержит связующее на водной основе, обеспечивающее скрепление частиц порошка):
- ✓ камеры построения;
- ✓ портала (горизонтальная штанга, перемещающаяся поперек каждого уровня построения и несущая каретку);
- ✓ каретки (перемещается вдоль портала для позиционирования печатающих головок);

- ✓ компрессора (производит сжатый воздух для удаления порошка с готовых изделий);
- ✓ фильтра материала обломков (предотвращает попадание в бункер любых твердых частиц во время переработки порошка после построения, обеспечивая чистое выполнение следующего цикла построения);
- ✓ электронного блока (встроенная ЭВМ, управляющая всеми операциями аппарата);
- ✓ бункера (содержит строительный материал, из которого создается модель);
- ✓ резервуара (накапливает связующее из картриджа и поставляет его в портал);
- ✓ станции обслуживания (при необходимости выполняет чистку печатающих головок);
- ✓ вакуумного клапана (устройство управления системой распределения порошка для его всасывания из камеры построения, при переполнении – из блока удаления порошка или вакуумного шланга обратно в бункер).

Цикл трехмерной печати на аппарате ZPrinter® состоит из трех этапов.

*Подготовка.* После того как на аппарат отправлено задание о формировании изделий, воздух в нем подогревается до температуры, обеспечивающей оптимальную рабочую среду процесса. Одновременно с этим на платформу построения в камере построения наносится начальный слой порошка толщиной 3,18 мм, на котором формируются изделия и который способствует извлечению готовой модели. Вместе с тем аппарат может запустить процесс автоматической юстировки печатающих головок, аналогичный такому же процессу в обычных струйных принтерах: на порошке печатается шаблон, который далее считывается видеосенсером, на основании чего производится собственно юстировка головок.

*Печать.* После окончания подготовки бункер со строительным материалом, перемещаясь над поверхностью платформы, наносит слой порошка толщиной 0,09 – 0,1 мм. Далее каретка с печатающими головками, перемещаясь над слоем строительного материала, в соответствии с формой поперечного сечения модели наносит жидкое связующее.

Связующее скрепляет частицы порошка в тех местах, где оно нанесено, и оставляет порошок незакрепленным на прочих участках слоя. В случае цветной печати используются цветные связующие, скрепляющие и окрашивающие изделия. Далее платформа построения опускается вниз на толщину слоя, и процесс повторяется до тех пор, пока не будет получено изделие.

*Удаление неиспользованного порошка и переработка.* После окончания печати модель некоторое время выдерживается в порошке до полного отверждения. Затем аппарат автоматически удаляет большую часть порошка вокруг модели за счет вакуумметрического давления. Для высвобождения от слежавшегося порошка платформе построения сообщают вибрацию. Нескрепленный порошок перемещается через систему, фильтруется и возвращается в бункер для повторного использования. Затем деталь вручную перемещается в камеру удаления остатков порошка (рис. 3.80).



Рис. 3.80. Извлечение готовой модели из аппарата ZPrinter® 450

В камере деталь обдувается сжатым воздухом для удаления остатков порошка; этот материал также автоматически всасывается обратно в аппарат и перерабатывается для последующего использования.

Для осуществления печати цветных изделий (рис. 3.81) программному обеспечению установки ZPrinter® требуются файлы, содержащие информацию о цвете изделий. Поскольку STL чаще всего содержит исключительно геометрию, в аппаратах компании «Z Corp., Inc.» используется ряд форматов, способных содержать информацию

о цвете изделий: 3DS, WRL (VRML), PLY, ZPR. Программное обеспечение ZEdit™Pro, поставляемое вместе с ZPrinter®, позволяет добавлять цвет, цветные текстуры и метки в файлы с трехмерными моделями. С целью экономии красителей окрашиванию подвергаются только объемы изделия, примыкающие к поверхностям изделия, внутренние скрытые объемы не окрашиваются.

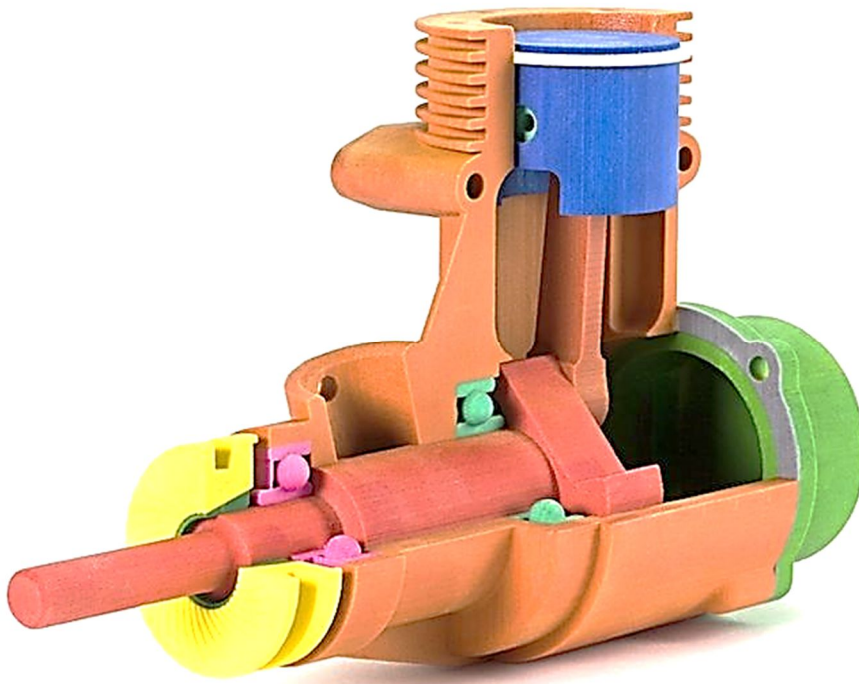


Рис. 3.81. Изделие, полученное трехмерной печатью в сборе

В аппаратах ZPrinter® используется широкий набор различных порошковых материалов [54]. В первую очередь это композитные порошки на основе гипса с различными добавками. В целом материалы делятся на четыре группы:

1. Материалы для концептуального моделирования, характеризующиеся низкой стоимостью, хорошей цветопередачей, минимальными затратами на постобработку и невысокими механическими свойствами.

2. Материалы для функциональных изделий, характеризующиеся высокими механическими свойствами.

3. Материалы для процесса литья, включающие материалы для изготовления литейных форм, обладающие высокой теплостойкостью, и материалы для литейных моделей.



4. Материалы для высокоэластичных изделий, состав которых способствует инфльтрации эластомерами.

В качестве связующего используются различные составы на водной основе с добавлением глицерина, поверхностно-активных веществ, пигментов и консервантов.

После того как модель извлечена из аппарата, она может быть использована, однако чаще ее подвергают постобработке – пропитке различными составами. Это связано с относительно невысокими свойствами «зеленых» изделий и их чувствительностью к атмосферной влаге.

Изделие, сформированное 3DP, обладает открытой пористостью, что способствует инфльтрации жидкости внутрь изделия. В качестве пропитки используются различные полимерные материалы, наносимые погружением, кисточкой или распылением аэрозоля. Также могут использоваться воскоподобные составы, наносимые специальными парафинирующими аппаратами, предварительно нагревающими изделия и погружающими их в расплавленную пропитку.

Пропитки (фиксирующие материалы) позволяют повысить механические свойства изделий и улучшить их внешний вид. Компания «Z Corp., Inc.» поставляет широкий спектр фиксирующих материалов. В простейшем случае в качестве фиксирующего материала могут применяться водные растворы солей (рекомендуются для монокромных концептуальных моделей), также используются полимерные и воскоподобные инфльтраты.

Резюмируя, можно отметить следующие важные **преимущества** реализации 3DP от компании «Z Corp., Inc.»:

- ✓ высокая производительность процесса;
- ✓ возможность изготовления цветных изделий с высококачественной цветопередачей;
- ✓ низкая стоимость эксплуатации за счет относительно недорогих материалов и их эффективного повторного использования;
- ✓ не требуются поддерживающие структуры;
- ✓ возможность использования в офисных помещениях за счет отсутствия вредных воздействий на окружающую среду и низкого уровня шума при работе;
- ✓ простота эксплуатации, связанная с тем, что конструкция во многом аналогична полиграфическим аппаратам струйной печати и

обслуживается похожим образом (замена картриджей с материалами, автоматическая самодиагностика и т. п.).

**Недостатками** 3DP от «Z Corp., Inc.» являются:

- ✓ использование нетрадиционных конструкционных материалов на основе гипса;
- ✓ для большинства применений требуется постобработка, порой достаточно длительная;
- ✓ высокая шероховатость («ребристость») формируемых изделий.

3DP от «Z Corp., Inc.» получила широкое распространение в концептуальном и функциональном моделировании, а также при производстве литейной оснастки.

Компания «The Ex One Company, LLC» поставляет технологии, использующие способ трехмерной печати для создания металлических и керамических изделий литейной оснастки. Процесс изготовления может быть как косвенным, так и прямым.

Технология Pro Metal<sup>®</sup> от компании «The Ex One Company, LLC» предназначена для послойного синтеза металлических и металлокерамических изделий (рис. 3.82, 3.83).

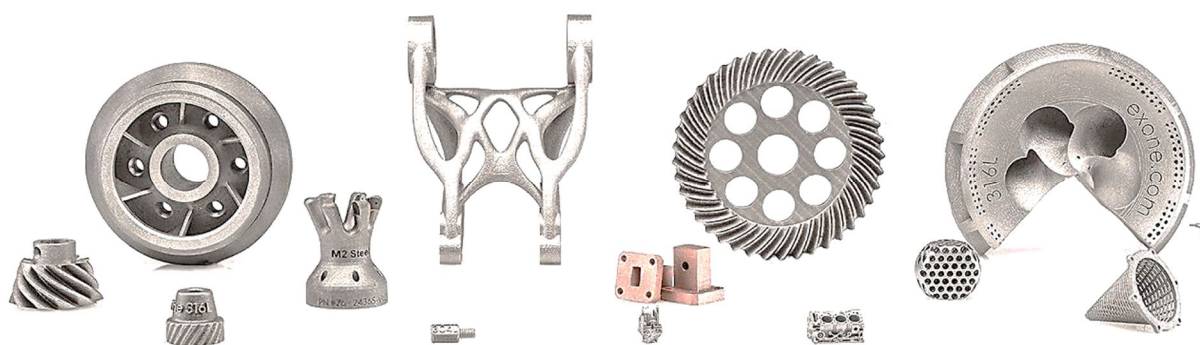


Рис. 3.82. Металлические изделия сложной формы, полученные технологией Pro Metal<sup>®</sup> (компания «The Ex One Company, LLC»)

Технология Pro Metal<sup>®</sup> является косвенным методом формирования изделий. На первом этапе в соответствии со способом 3DP формируется «зеленое» изделие путем скрепления частиц порошка полимерным связующим. Также изделие обладает пористостью около 50 %. Далее производится процесс выжигания связующего при относительно невысокой температуре и инфильтрация изделия. Наиболее



распространенными материалами порошка следует назвать нержавеющей и инструментальной стали. В качестве инфильтрата обычно используется бронза или медь.

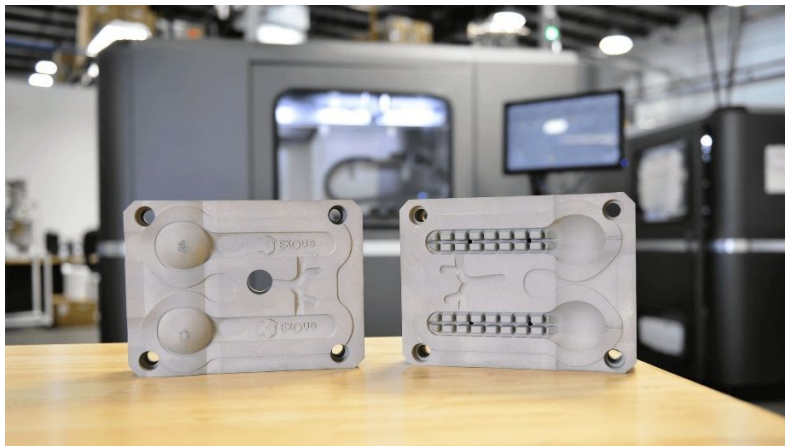


Рис. 3.83. Литейная форма, полученная технологией Pro Metal<sup>®</sup>RCT<sup>™</sup> (компания «The Ex One Company, LLC»)

Технология Pro Metal<sup>®</sup>RCT<sup>™</sup> предназначена для послойного синтеза изделий литейной оснастки. В качестве строительного материала используется кварцевый песок, в качестве связующего – фурановые смолы (термореактивные олигомеры). «Отпечатанные» данным способом изделия не нуждаются в последующей постобработке.

Технология Pro Metal<sup>®</sup>RCT<sup>™</sup> эффективна при изготовлении крупногабаритных литейных форм, обеспечивая высочайшую для послойного синтеза производительность: форма с габаритными размерами до 1500×750×700 мм может быть полностью изготовлена за двое суток.

### ***3.5.3. Трехмерная аэрозольная печать***

Одним из недостатков 3DP и BPM (струйная печать) является невысокое разрешение в плоскости XY, что связано с невозможностью получения капель размерами в единицы микрометров и обусловлено эффектами смачивания наносимой жидкостью стенок дюз печатающих головок. По той же причине в струйной печати ограничено использование материалов с высокой вязкостью. Для решения данной задачи, являющейся актуальной в ряде сфер применения послойного синтеза, компания «Optomec, Inc.» (США) предложила технологию трехмерной аэрозольной печати (Aerosol Jet Process).

Сущность способа трехмерной аэрозольной печати состоит в реализации следующих операций:

- ✓ распыление жидкого материала с созданием высокоплотного аэрозоля с размером частиц жидкой фазы 0,5 – 5 мкм;
- ✓ транспортировка аэрозоля транспортирующим инертным газом в печатающую головку;
- ✓ фокусировка аэрозоля кольцевой газовой оболочкой и высокоскоростное осаждение частиц жидкой фазы на подложку.

Используются два способа распыления материала:

1. Для материалов с невысокой вязкостью (0,7 – 10 сПз) используют ультразвуковое распыление (рис. 3.84, а), при котором взвесь с размерами частиц до 50 нм образуется за счет воздействия ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя;

2. Для более вязких материалов (10 – 50 сПз) и в случае необходимости создания взвесей с меньшей дисперсностью (размер частиц до 500 нм) используется пневматическое распыление (рис. 3.84, б), при котором взвесь образуется путем воздействия потока газа на распыляемое вещество. Импактор в схеме установки позволяет увеличить концентрацию частицы наносимого материала в аэрозоле.

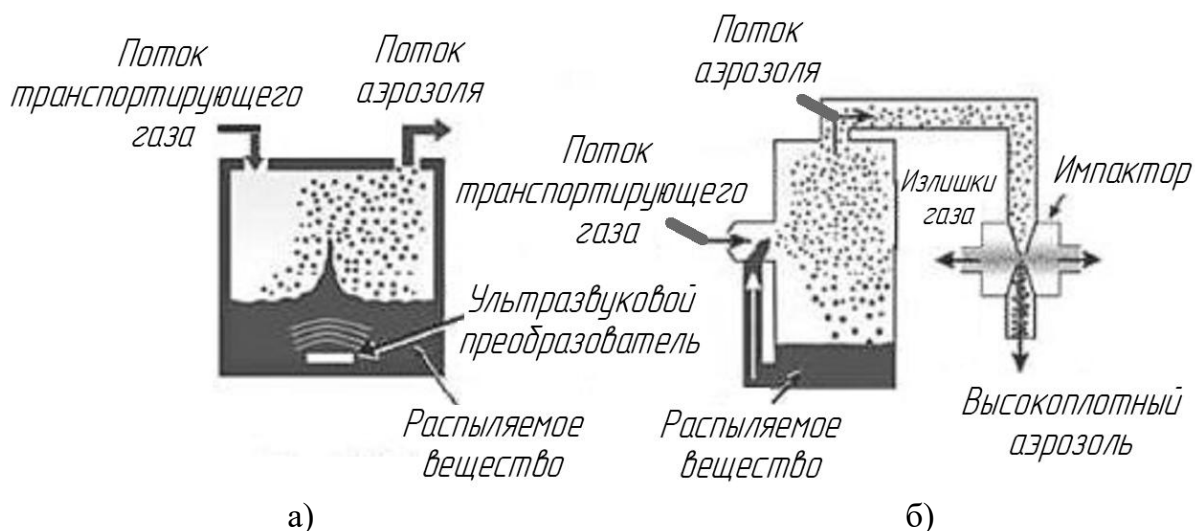


Рис. 3.84. Способы распыления строительного материала в технологии трехмерной аэрозольной печати: а – ультразвуковое; б – пневматическое

Наиболее существенное отличие аэрозольной печати от струйной в том, что капли наносимого вещества не контактируют со стенками дюз печатающей головки за счет создаваемой кольцевой обо-

лочки транспортирующего газа (рис. 3.85), что позволяет более тонко локализовать наносимый материал на подложке. Такой прием позволяет реализовать следующие преимущества аэрозольной печати перед струйной:

- ✓ более высокое разрешение печати (размер топологического элемента от 10 мкм);
- ✓ возможность получения очень малой толщины слоя (0,1 – 2 мкм);
- ✓ использование материалов в широком диапазоне вязкости (1 – 1000 сПз);
- ✓ возможность нанесения материалов на рельефные подложки.

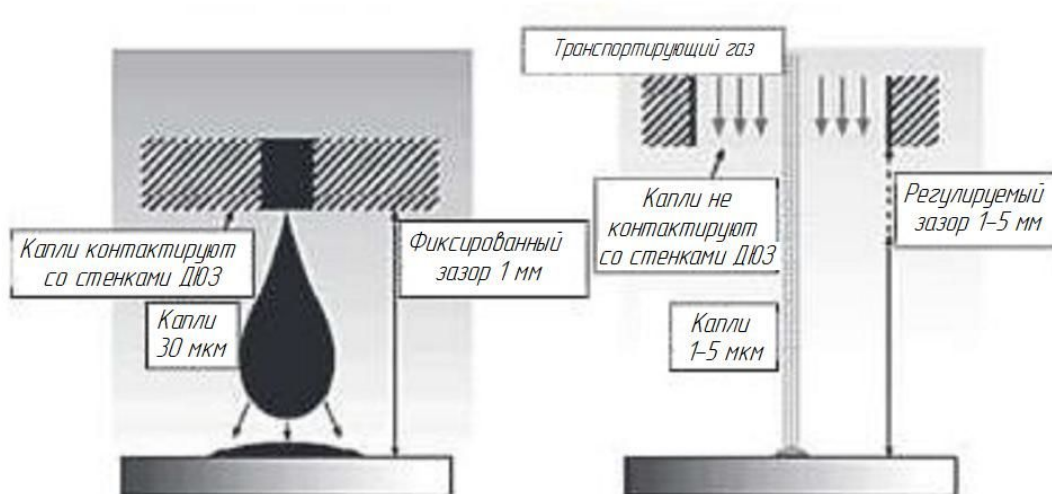


Рис. 3.85. Различия струйной (слева) и аэрозольной печати (справа)

В качестве осаждаемых материалов используются жидкости, растворы и взвеси. При этом к компонентам осаждаемых материалов предъявляются следующие требования:

- ✓ жидкая фаза (растворитель) должна обладать высокой температурой кипения и низким давлением насыщенного пара;
- ✓ частицы твердой дисперсной фазы должны иметь размер не более 500 нм (предпочтительно до 100 нм);
- ✓ массовая доля частиц твердой дисперсной фазы должна составлять 5 – 70 %.

В установках трехмерной аэрозольной печати могут быть использованы различные материалы, подразделяющиеся по типу на следующие группы:

✓ проводники, представленные взвесями нанопорошков металлов (золото, серебро, медь, никель), углеродных нанотрубок, токопроводящих полимеров (PEDOT: PSS);

✓ материалы сопротивлений, представленные различными полимерами (полиимид, акриловые полимеры);

✓ диэлектрики и связующие, представленные различными полимерами (поливинилпирролидон, тефлон, полиимид и др.);

✓ биоматериалы, представленные биodeградирующими сополимерами (PLGA);

✓ полупроводники;

✓ материалы для травления электросхем.

Для закрепления материалов на подложке может использоваться постобработка, например, спекание частиц размещенного порошка в печи. Частицы могут спекаться и непосредственно после размещения порошка на подложке путем воздействия лазерного излучения.

Аэрозольная печать применяется не для создания самостоятельных изделий, а для выращивания трехмерных объектов из нескольких слоев на исходных заготовках – подложках. В качестве материалов подложек могут использоваться полимеры (полиэстер, полиимид), металлы, стекло, материалы с пленками из оксида индия и олова (ITO), кристаллический кремний (C-Si).

Область применения трехмерной аэрозольной печати весьма специфична и в первую очередь связана с задачами создания миниатюрных изделий с высоким разрешением, таких как изготовление изделий микроэлектроники (элементы солнечных батарей, ЖК-панели, интерконнекторы для 3D интегральных схем, интегрированные пассивные компоненты на жестких и мягких подложках и др.), изготовление изделий биотехнологии, восстановление изделий, нанесение датчиков и схем на детали машин (создание интеллектуальных узлов).

Компания «Optomec, Inc.» (США) выпускает установку трехмерной аэрозольной печати Aerosol Jet 300P/SE (рис. 3.86).

В целом Aerosol Jet 300P/SE представляет собой устройство плоттерного типа с высокоточным позиционированием, на портале которого установлен печатающий узел. Установка оснащена двумя распылителями строительного материала: ультразвуковым (для маловязких материалов) и пневматическим (для более вязких материалов или для нанесения более толстых слоев). Опционально система осна-

щается маломощным лазером для спекания частиц порошков (чаще всего металлов) после размещения.

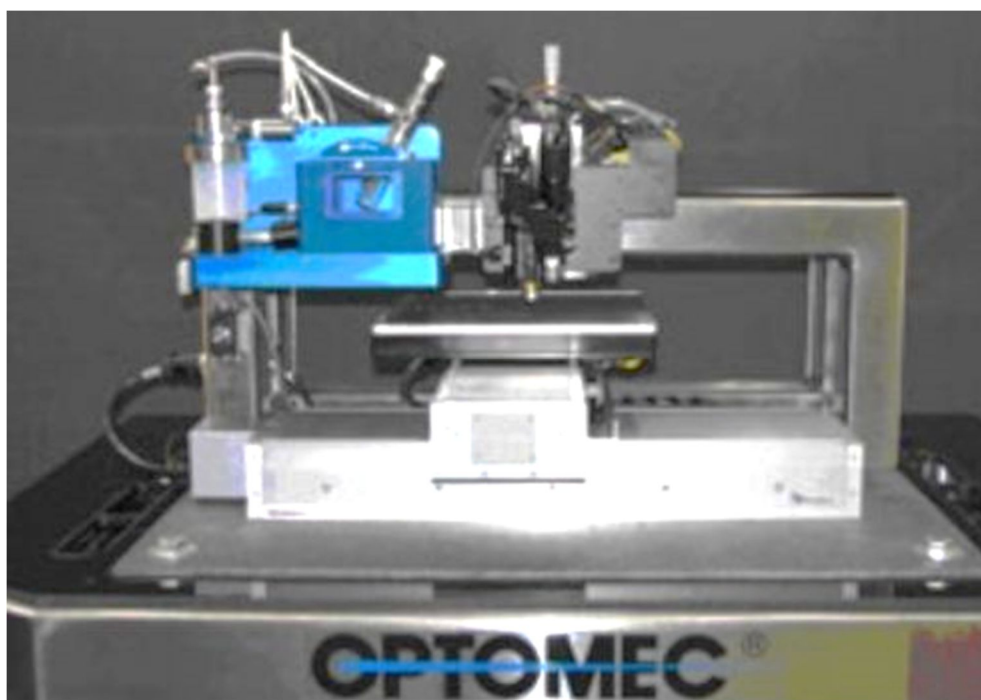


Рис. 3.86. Фотография установки Aerosol Jet 300P/SE (компания «Optomec, Inc.», США)

### 3.6. Методы послойной наплавки

Методы послойной наплавки (beam deposition [18]) заключаются в изготовлении изделий путем нанесения слоев строительного материала посредством сварки плавлением, причем наносимый материал подвергается плавлению до момента его размещения на изделии. Изначально методы послойной наплавки (ПН) разрабатывались для изготовления металлических изделий, однако в настоящее время помимо металлов в данных методах, как и в СЛС, могут также использоваться керамика и термопластичные полимеры. Послойная наплавка позволяет получать полнофункциональные изделия с механическими свойствами, не уступающими, а в ряде случаев и превосходящими свойства изделий, полученных традиционными способами из тех же материалов.

Различные способы послойной наплавки отличаются в первую очередь источниками сфокусированного теплового воздействия. Обычно в качестве такового используют мощное лазерное излучение,

электронные пучки и плазменной дугой. Также послойная наплавка отличается кинематикой оборудования (вплоть до использования пятикоординатных позиционирующих систем и гексаподов) и способом подачи строительного материала. Пяти- или шестикоординатные системы используются в случае сложной геометрии изделий, чтобы избежать необходимости создания поддерживающих структур, или для наплавки на подложках со сложной геометрией.

В большинстве коммерческих технологий в качестве источника теплового воздействия используется лазер.

### ***3.6.1. Способы подачи строительного материала***

При послойной наплавке материал должен быть доставлен в зону теплового воздействия, в которой он подвергается плавлению, и в дальнейшем перенесен на поверхность ранее сформированных слоев или подложки. При подаче строительного материала должны быть решены следующие задачи:

- ✓ доставка строительного материала в зону теплового воздействия с достаточной плотностью энергии для плавления материала;
- ✓ надежный локализованный перенос расплава на подложку или ранее сформированные слои;
- ✓ защита строительного материала в нагретом состоянии от вредных воздействий окружающей среды;
- ✓ нанесение слоев материала минимальной толщины;
- ✓ нанесение слоев материала с удовлетворительной структурой;
- ✓ минимальное образование отходов строительного материала.

В случае лазерной наплавки наиболее распространены следующие схемы подачи материала.

1. Подача материала в виде наплавочной проволоки (рис. 3.87, а). Данный способ характеризуется полным использованием строительного материала, однако слои имеют большую толщину и в наплавленных слоях возможно наличие пор. Необходим тщательный контроль параметров наплавки для обеспечения требуемых размеров наплавливаемых треков.

На поверхности треков образуются «волны». Изменение направления наплавки треков затруднено, динамически изменять толщину наплавливаемого слоя невозможно. Такой способ подходит в случае относительно несложной геометрии формируемых изделий

либо в связке с субтрактивными технологиями, например, при использовании совместно с наплавкой фрезерования, исправляющего форму наплавленных слоев.

2. Подача порошкового материала через одиночное сопло транспортирующим защитным газом в виде двухфазного потока (рис. 3.87, б). При подаче материала в виде порошка последний подается с избытком, что способствует эффекту компенсации неровностей нижележащих треков, но в то же время приводит к потерям наплавочного материала. Такой способ позволяет варьировать направление наплавки треков.

3. Коаксиальная подача порошка через несколько (3, 4, 6, 9 и т. д.) радиально-симметричных сопел транспортирующим защитным газом в виде двухфазного потока (рис. 3.87, в). При таком способе подачи уменьшаются потери порошка, улучшается локализация переноса расплава на подложку или ранее сформированные слои.

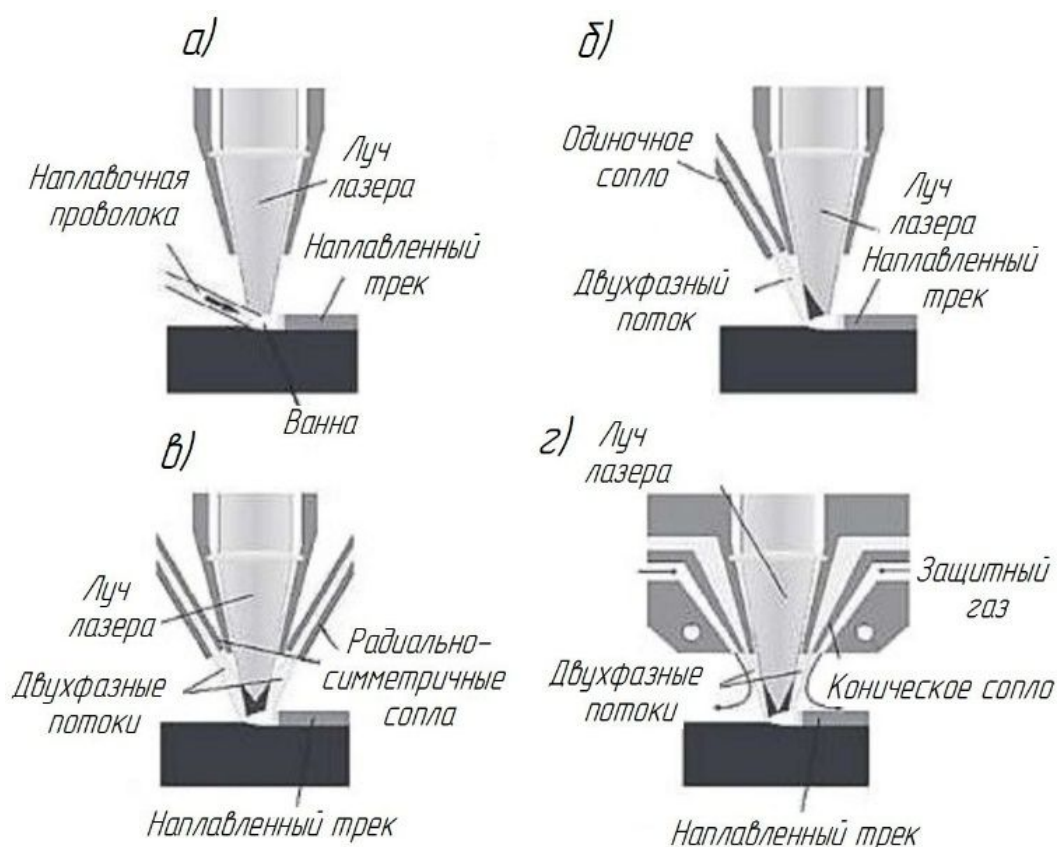


Рис. 3.87. Схемы подачи материала в технологиях послойной лазерной наплавки: а – подача проволокой; б – подача с одним соплом; в – коаксиальная с радиально-симметричными соплами; г – коаксиальная с коническим соплом



4. Коаксиальная подача порошка через коническое сопло транспортирующим защитным газом в виде двухфазного потока с использованием «фокусирующего» потока защитного газа (рис. 3.87, г). Данный способ подачи улучшает локализацию переноса расплава. Помимо того, тороидальный поток защитного газа вокруг расплава надежно защищает его от вредных воздействий окружающей среды.

В коммерческих технологиях послойной лазерной наплавки наибольшее распространение получили коаксиальные схемы подачи строительного материала, поскольку они позволяют создавать слои с удовлетворительной структурой, изделия со сложной геометрией и характеризуются относительно небольшими потерями порошка.

### ***3.6.2. Параметры процесса послойной лазерной наплавки***

Качество полученных послойной лазерной наплавкой изделий непосредственно определяется параметрами процесса, среди которых наиболее важными считаются режим наплавки и стратегия формирования треков.

В режим наплавки входят: мощность лазерного излучения  $P$  (Вт); скорость движения наплавляющей головки  $V$  (мм/с); шаг треков  $S$  (мм) и расход наплавочного материала  $F$  (г/ч). Режимы наплавки зависят в первую очередь от марки наплавляемого материала, геометрии изделия, требуемой толщины слоя, материала подложки.

В отличие от большинства других аддитивных технологий, в которых системы поставляются с программным обеспечением и автоматизированы устанавливающим оптимальные режимы реализации процессом, технологии послойной лазерной наплавки поставляются как «гибкие» системы, в которых выбор соответствующих режимов возлагается на пользователя системы. Данный факт повышает требования к квалификации персонала, однако позволяет избежать привязки к материалам производителя и самостоятельно повышать эффективность процесса.

Стратегия формирования треков определяет направление наплавки треков в различных слоях. Как правило, с целью снижения остаточных напряжений, формируемых в изготавливаемых изделиях, следует чередовать различные направления наплавки треков. Направления чередуют в случайном порядке с шагом, кратным 30, 45 или 90 градусам.



Ряд систем оснащается системами контроля параметров процесса, характеристик расплава, размеров формируемых треков, позволяющих динамически корректировать параметры процесса.

### 3.6.3. Технологии послойной лазерной наплавки

В настоящее время существует около десятка различных технологий послойной лазерной наплавки, находящихся на различных стадиях коммерциализации и разработки: LENS™ – Laser Engineered Net Shaping («Optomec, Inc.», США), DMD® – Direct Metal Deposition («The POM Group, Inc.», США), DLF – Directed Light Fabrication (Лос-Аламосская национальная лаборатория, США), 3D Laser Cladding (Лазерный центр Фландрии, Бельгия; Ливерпульский университет, Великобритания), 3D Laser Welding (Южный методистский университет, США) и др. Наибольший коммерческий успех имеют технологии LENS™ и DMD®.

LENS™ является первой коммерчески реализованной технологией послойной лазерной наплавки. В технологии LENS™ (рис. 3.88) изделие формируется на подложке, установленной на подвижной платформе построения.

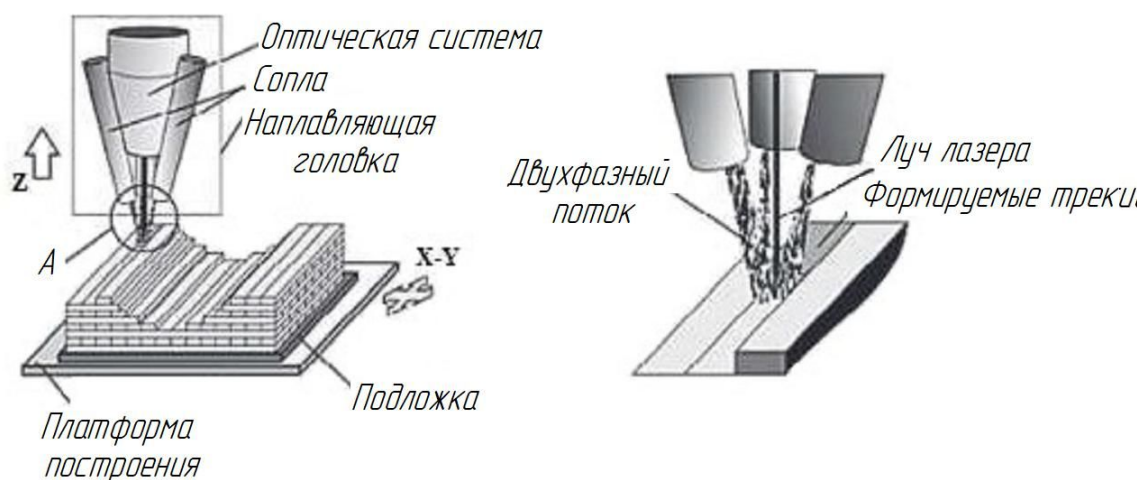


Рис. 3.88. Схема послойной лазерной наплавки LENS™ (компания «Optomec, Inc.»)

Используется коаксиальная подача порошкового материала радиально-симметричными соплами. В качестве источника теплового воздействия используется лазер мощностью 0,5 – 4 кВт. Расплав размещается на поверхности сформированных слоев или подложке,

формируя отдельные треки слоя, за счет перемещения подвижной платформы построения по осям  $X$  и  $Y$ . Системы LENS™ могут оснащаться поворотными устройствами, добавляющими поворотные координаты  $A$  и  $B$ , а также сенсорами для контроля расплава.

В настоящее время компания «Optomec, Inc.» выпускает три модели установок LENS™: LENS™ 850 R, LENS™ 750 и LENS™ MR 7.

Установка LENS™ 850 R (рис. 3.89) имеет пять управляемых осей, наибольшие габаритные размеры изготавливаемых изделий и рекомендуется для промышленного использования при восстановлении и исправлении крупных металлических изделий машиностроения. Для LENS™ 850 R доступны все опции: дополнительные поворотные оси, автоматический контроль процесса.



Рис. 3.89. Внешний вид установки LENS™ 850 R

В технологии DMD® (рис. 3.90) используются конические наплавляющие головки с коаксиальной подачей порошка. Стол установок неподвижен, движение осуществляет оптическая головка. Установки выполняют по пяти- или шестикоординатной схеме, все они оснащаются сенсорами для контроля расплава.



Рис. 3.90. Схема установки послойной лазерной наплавки DMD®

Установки на базе промышленных роботов обеспечивают весьма большие размеры рабочей области, однако характеризуются низкой точностью позиционирования и в первую очередь используются для восстановления крупногабаритных изделий.

Установки стандартной компоновки предназначены для послойного изготовления полнофункциональных металлических изделий, восстановления деталей машин и инструментов, поверхностного упрочнения изделий, а также для изготовления изделий военного назначения.

В качестве строительного материала в процессах послойной наплавки чаще всего используются металлические порошки из следующих групп материалов: инструментальная сталь, нержавеющая сталь, кобальтовые сплавы, жаропрочные сплавы, титановые сплавы, медные сплавы, алюминиевые сплавы. Выбор строительного материала зависит от материала подложки или восстанавливаемого изделия.

Точность формируемых послойной лазерной наплавкой изделий относительно невысока – погрешность формы составляет 0,15 – 0,3 мм [55]. Шероховатость наплавленной поверхности  $Ra = 10 - 25$  мкм. В связи с этим изделия, полученные послойной лазерной наплавкой, подвергают последующей механической или электроэрозионной обработке.

Послойная наплавка – один из наиболее затратных способов послойного синтеза изделий, что объясняется его низкой производитель-

ностью (производительность по массе – 25 – 40 г/ч), большой энергоемкостью и высокими требованиями к квалификации персонала.

Однако возможности получения изделий с уникальными физико-механическими свойствами и восстановления дорогостоящих деталей машин определяют успех данной технологии в специфичных областях применения.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие методы фотополимеризации вы знаете?
2. Опишите процесс векторно-сканирующего отверждения.
3. Как работает механизм фотополимеризации?
4. Какие погрешности возникают в процессе фотополимеризации и каковы их причины?
5. Какие методы слияния порошковых оснований вы знаете?
6. Приведите примеры и опишите процессы листового ламинирования.
7. Какие материалы используются в процессе ультразвуковой консолидации?
8. Перечислите кинематические схемы 3D-принтеров на основе FDM-технологии.
9. В чем преимущества и недостатки материалов, используемых в установках аддитивного производства на основе FDM-технологии?
10. Опишите процесс трехмерной печати.
11. Приведите схему установки послойной лазерной наплавки (DMD).

## Глава 4. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА

Послойный синтез (ПС) занимает доминирующее положение среди аддитивных способов формообразования, что связано с простотой их технической реализации в сравнении с синтезом локализованными объемами. Несмотря на разнообразие различных способов послойного синтеза, всех их объединяют общие черты, обусловленные одним принципом создания формы изделия:

- ✓ изделия производятся аддитивным методом путем последовательного добавления плоских или концентрических цилиндрических слоев материала, называемого строительным (building material);

- ✓ формообразование выполняется непосредственно на основе компьютерного геометрического образа изделия;

- ✓ технологическая оснастка не участвует в формообразовании (в ряде технологий листового ламинирования при формообразовании могут использоваться универсальные режущие инструменты, обычно фрезы. Процессы листового ламинирования относятся к комбинированным субтрактивно-аддитивным способам формообразования);

- ✓ поверхности изделия формируются боковыми сторонами добавляемых слоев, аппроксимируя форму первых;

- ✓ точность формируемых изделий ограничена минимальной толщиной слоев;

- ✓ затраты времени на формирование изделия увеличиваются с уменьшением толщины слоев.

### 4.1. Структура технологического процесса послойного синтеза

Процессы ПС имеют сложную структуру и заключаются не только в непосредственном формировании физических моделей, но и в ответственных этапах формирования данных, необходимых для осуществления процесса. В целом структура ПС состоит из четырех этапов: подготовка модели изделия, подготовка процесса (process planning), формирование изделия, постобработка.

### 4.1.1. Этап подготовки цифровой модели изделия

Создание цифровой модели подразумевает подготовку исходных данных о модели. Данные электронной геометрической модели подразделяются на шесть видов [56] (в отечественных нормативных документах выделяют лишь три [38]), отличающихся формой представления и источниками происхождения (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Виды данных о цифровой модели изделия

| Вид данных   | Источник  | Основная сфера применения                   |
|--|---|---|
| Поверхностные модели   | Системы трехмерного моделирования, в том числе САПР, и пакеты трехмерного дизайна | Производство, дизайн                        |
| Твердотельные модели   |   |   |
| Каркасные модели   |   |   |
| Массивы точек  | Координатно-измерительные машины, 3D-сканеры                                      | Обратный инжиниринг                         |
| Наборы растровых послойных изображений                           | Компьютерная томография   | Медицина, научные исследования, интроскопия |
| Математические модели (алгебраические модели, алгоритмы и т. п.) | Математические пакеты программ  | Научные и инженерные исследования           |
| Совокупность сечений модели                                      | Топография, геофизика и т. п.   | Научные исследования, картография           |

Наиболее распространенным источником электронных моделей изделий в машиностроении являются системы автоматизированного проектирования, а также пакеты трехмерного дизайна. При этом данные представляются в виде твердотельных, поверхностных или каркасных геометрических моделей изделия. Остальные виды цифровых моделей, как правило, используются в довольно узких специализированных областях. Например, данные компьютерной томографии характерны для медицинских применений послойного синтеза и интроскопии, а данные в виде уравнений и алгоритмов характерны для визуализации данных научных исследований.

Данные, полученные в САД-системах, как правило, перед передачей их на следующий этап подвергаются постпроцессингу. Пост-

процессинг – процедура, осуществляющая преобразование данных из внутреннего формата конкретной САПР в некоторый нейтральный формат данных, воспринимаемый данным программно-аппаратным комплексом послойного синтеза. Существует значительное количество форматов данных, используемых в послойном синтезе. Наиболее распространенные форматы представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Основные форматы данных цифровых моделей САД-систем,  
использующиеся в послойном синтезе

| Наименование формата                             | Краткая характеристика  | Примечания                          | Форма представления |                   |             |     |      |
|--|---|-------------------------------------|---------------------|-------------------|-------------|-----|------|
|  |   |                                     | Триангуляция        | Фасеточная модель | Поверхности | CSG | BREP |
| <b>STL</b><br>(Stereolithography)                | Описывает поверхности моделей набором смежных треугольников. Содержит дублирующиеся данные. Не содержит сведений о целостности модели                                     | Промышленный стандарт де-факто      | ☺                   | –                 | –           | –   | –    |
| <b>STH</b><br>(Surface Triangles Hinted)         | Построен на основе гибких правил записи данных о вершинах и их связности. Более компактен, чем STL. Опционально может содержать структурные данные о телах и поверхностях | Альтернатива STL                    | ☺                   | –                 | –           | –   | –    |
| <b>CFL</b><br>(Cubital Facet List)               | Поверхности аппроксимируются плоскими многоугольниками, каждый из которых может содержать отверстия   | Не получил широкого распространения | ☺                   | ☺                 | –           | –   | –    |
| <b>RPI</b><br>(Rensselaer Polytechnic Institute) | Содержит представление в виде фасеточной модели и CSG-дерева, выраженного в понятиях булевых операций   | –                                   | ☺                   | ☺                 | –           | –   | –    |



| Наименование   | Краткая характеристика   | Примечания                         | Форма представления |                   |             |     |      |
|--|--|------------------------------------|---------------------|-------------------|-------------|-----|------|
|  |  |                                    | Триангуляция        | Фасеточная модель | Поверхности | CSG | BREP |
| <b>IGES</b><br>(Initial Graphics Exchange Specification)     | Формат, поддерживающий гибкое хранение данных систем автоматизации инженерной деятельности на основе регулярных структур данных        | Склонен к появлению ошибок         | ☺                   | ☺                 | ☺           | ☺   | ☺    |
| <b>STEP</b><br>(Standard for Exchange of Product model data) | Формат, поддерживающий гибкое хранение информации о жизненном цикле продукции на основе языка EXPRESS                                  | Является основой для развития CALS | ☺                   | ☺                 | ☺           | ☺   | ☺    |
| <b>AMF</b><br>(Additive Manufacturing File Format)           | Содержит один или несколько объектов, описанных как треугольные сетки. В файле также хранятся геометрия, цвет и материал этих объектов | Альтернатива STL                   | ☺                   | –                 | –           | –   | –    |

Наиболее распространенным в БПИ форматом данных является STL (Stereolithography), разработанный компанией «3D Systems Corp.» (США). В STL-файле используется триангуляция поверхностей (рис. 4.1), т. е. геометрия описывается набором смежных треугольников, аппроксимирующим поверхности изделий.



Рис. 4.1. Поверхностное (слева) и триангулированное (справа) представление трехмерной модели (ПО Creo Parametric, «Parametric Technology Corporation (PTC)» США)



Существуют текстовый (ASCII) и двоичный варианты STL-файлов (рис. 4.2).

Первый вариант представляет собой текстовый файл с последовательным описанием треугольников, состоящим из координат нормального вектора и вершин. В отличие от текстового двоичный STL-файл более компактен и помимо описания координат треугольников может содержать для каждого из них атрибут (16 бит), а также количество треугольников. Большинство систем не использует каким-либо образом атрибут двоичного STL-файла.

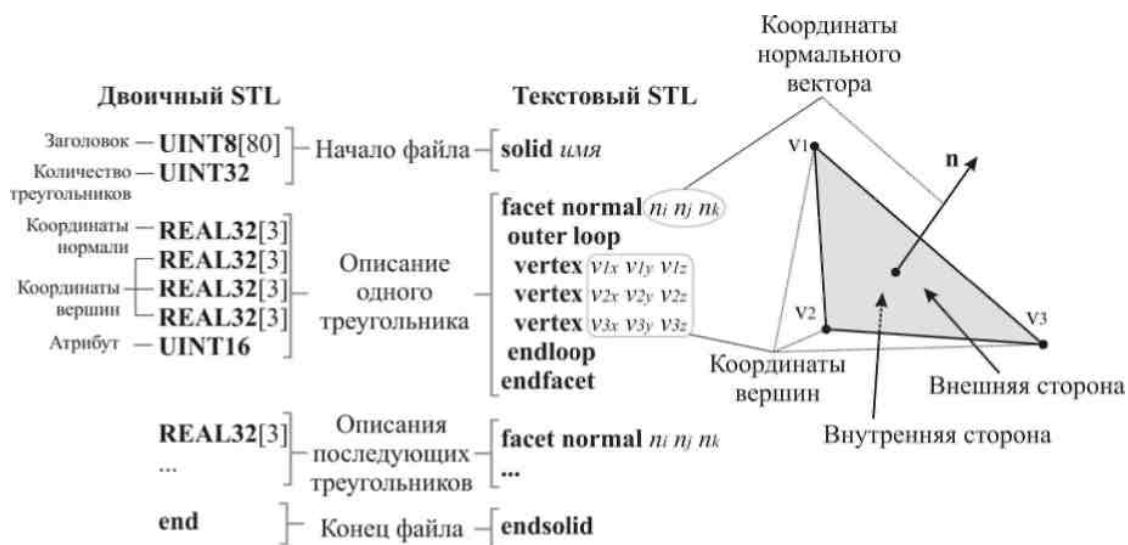


Рис. 4.2. Структура STL-файлов

STL-файл описывает форму криволинейных поверхностей приблизительно. Точность описания зависит от количества треугольников и может настраиваться при экспорте данных из CAD-системы в STL-файл. Описание геометрии в STL избыточно – каждая вершина описывается два раза в двух смежных треугольниках, а нормаль может быть однозначно определена из координат вершин треугольников. Смежность треугольников (целостность модели) не описывается, что может приводить к наличию ошибок в файле. Кроме того, в STL-файле нет сведений о цвете поверхностей, что является обязательной информацией для цветных технологий послойного синтеза.

Фасеты определяют поверхность трехмерного объекта. Ориентация фасетов (что является внутренней, а что внешней частью) указывается двумя способами:

- 1) направление нормали наружу;

2) вершины должны быть перечислены против часовой стрелки, если смотреть на объект снаружи (правило правой руки). Данные правила показаны на рис. 4.3.

**Вершина к вершине.** У смежных треугольников должны быть две общие вершины, т. е. вершина одного треугольника не может лежать на стороне другого (рис. 4.4).

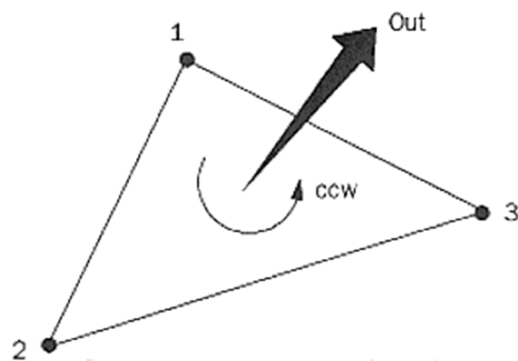


Рис. 4.3. Ориентация фасетов в зависимости от нормали и порядка, в котором перечислены вершины

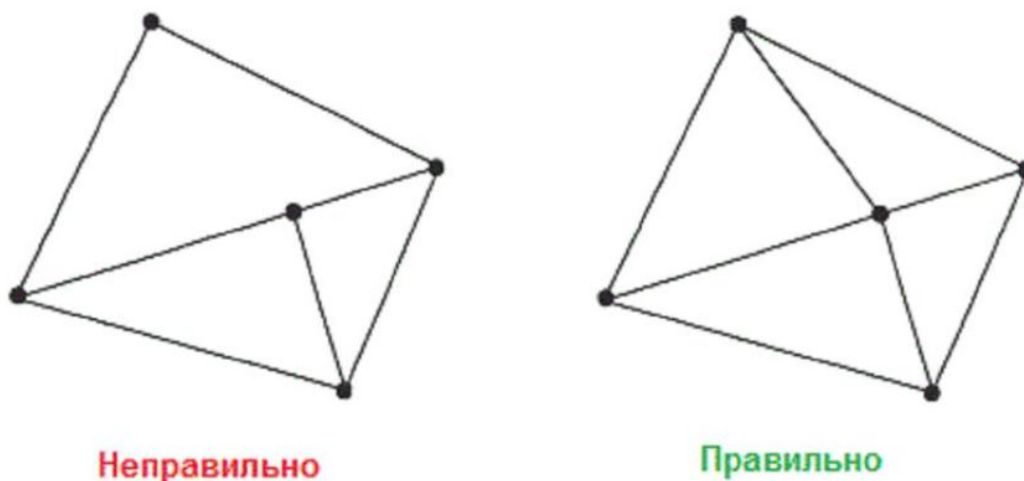


Рис. 4.4. Правило «вершина к вершине»

Левая фигура показывает неправильное расположение, а фигура справа – правильное [57]. Объекты должны быть расположены в положительном октанте. Другими словами, все координаты вершин должны быть положительно определенными числами (неотрицательными и ненулевыми). В STL-файле не содержится информации о масштабе, координаты находятся в произвольных единицах.

В официальном документе «3D Systems Corp.» (США) указано, что существует положение о включении специальных атрибутов для построения параметров, но не предоставлен формат данных атрибу-

тов. Также предоставляется сомнительная информация о минимальной длине и максимальном размере треугольника.

Обычно STL-файл сохраняется с расширением STL без учета регистра. Стандарт STL включает в себя два формата данных – ASCII и бинарный.

Для решения задачи описания цвета поверхностей в STL-файлах предложены способы использования атрибута в двоичных файлах. Например, в ПО «Materialise Magics» («Materialise NV», Бельгия) атрибут используется следующим образом:

- ✓ биты с 0 по 4-й описывают интенсивность красного цвета в диапазоне 0 – 31;

- ✓ биты с 5 по 9-й описывают интенсивность зеленого цвета в диапазоне 0 – 31;

- ✓ биты с 10 по 14-й описывают интенсивность синего цвета в диапазоне 0 – 31;

- ✓ бит 15 принимает значение 1, в случае если цвет необходимо учитывать, и значение 0, если цвет необходимо игнорировать.

Данным образом можно задавать цвет каждого треугольника, аппроксимирующего поверхность изделия с глубиной цвета 15 бит (High Color), что не всегда достаточно для полноцветных машин послойного синтеза, например «ZPrinter® 650» от «Z Corp.» (США).

В ряде случаев в установках послойного синтеза напрямую используются форматы, поддерживающие цвет, например 3DS, VRML. Также могут использоваться собственные форматы данных производителей оборудования и ПО послойного синтеза, например формат ZPR от «Z Corp.» (США).

Для решения указанных проблем STL-файлов разрабатывается метод представления электронной модели с помощью воксельного способа описания ее геометрии. Воксель, или трехмерный пиксель, представляет собой элемент объема в форме куба. Преимущество этого способа заключается в хранении информации в виде трехмерного массива, каждая ячейка которого содержит данные о вокселе, причем положение вокселя определяется положением его ячейки в массиве (рис. 4.5, а, б).

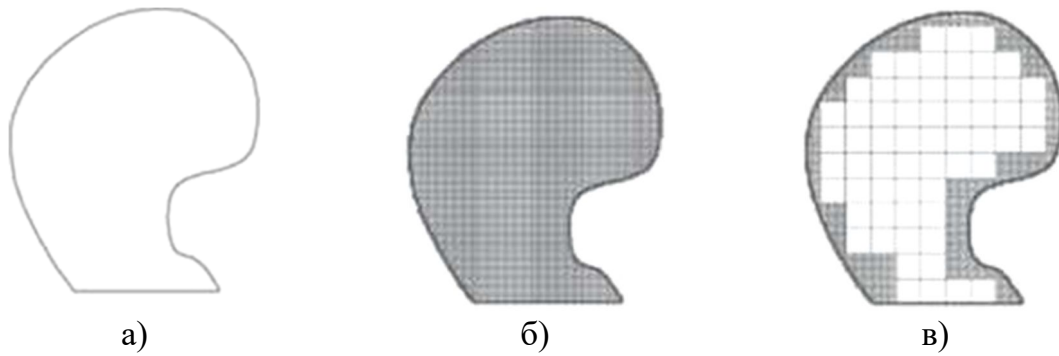


Рис. 4.5. Воксельное представление модели (вид сбоку, двумерная проекция): а – модель; б – воксельное заполнение стандартное; в – воксельное заполнение с разреженным воксельным деревом

Хотя воксельные модели требуют большего расхода оперативной памяти ЭВМ, их представление является более естественным, так как описывает их трехмерно (что также наиболее соответствует модели БПИ). Следует отметить, что возможно снижение требований к памяти при описании модели воксельным способом, если применяется разреженное воксельное дерево (рис. 4.5, в). Ячейка массива может хранить различный тип информации (в кодированном виде), например, внутренний/внешний/граничный воксель, что позволяет описать особенности частей изделия, а также тип покрытия. С точки зрения топологических манипуляций, в том числе разделения модели на слои, воксельная модель представляет значительные преимущества [57].

Сегодня STL-файл стал де-факто стандартом компьютерной электронной модели в БПИ. Формат STL-файлов представляет собой сеть соединенных между собой треугольников, где каждый из них описывается набором параметров (координатами вершин и нормалью к граням). Электронный файл STL-формата, таким образом, очень прост по структуре. Однако метод, аппроксимирующий кривые поверхности треугольниками, не является достаточно удобным и точным (рис. 4.6). Уменьшение размеров треугольников приводит к уменьшению погрешности и возрастанию количества треугольников и размера файла, увеличению вычислительной мощности ЭВМ и возможных ошибок геометрической модели. Существуют различные механизмы триангуляции электронной модели, однако они не удовлетворяют возрастающим требованиям БПИ. На сегодняшний день ис-

пользуются STL-файлы размером более 100 Мбайт, обеспечивающие приемлемые характеристики точности модели.

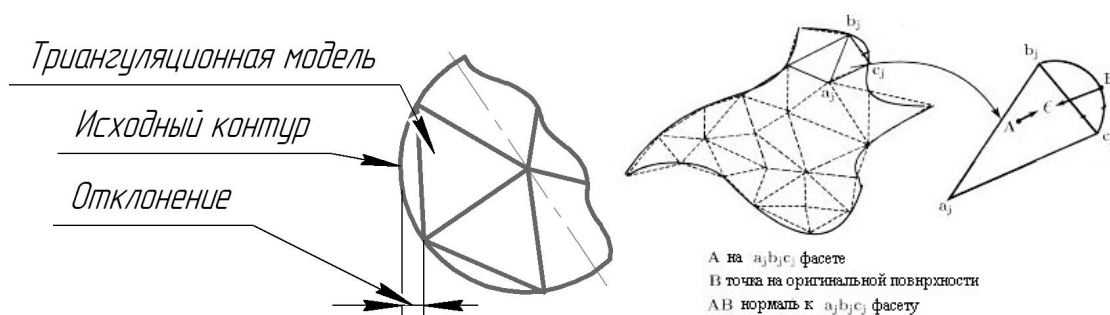


Рис. 4.6. Отклонение модели от контура при триангуляции

STL-файл не позволяет адекватно представлять многоматериальные модели, так как отдельные объекты модели (треугольники) не несут дополнительной информации о цвете, материале и т. п. Таким образом, сложнопрофильная многоматериальная модель для БПИ не отличается от компоновки двух обычных моделей. Наибольшей сложностью в данном случае представляется необходимость выявления нестыковок моделей, которые могут проявляться в изготавливаемом изделии в виде пор, несплошностей и др.

Зарубежный стандарт ISO/STP 2915-13 (Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) – технический норматив для формата файла аддитивного производства) определяет новый формат файлов для БПИ – AMF. В новом формате модель описывается сеткой с использованием списка граней (множеством граней и вершин), а не вершин, как в STL-формате. Указанный способ позволяет удобно работать в процессе моделирования и не требует избыточных ресурсов ЭВМ за счет аппаратной поддержки многих операций. Отметим также, что топологические операции все еще сложны для полигональных моделей. Для повышения точности представления предусмотрены так называемые изогнутые треугольники, задающиеся нормальными при вершинах или касательными к ребрам, соединяющим вершины. В обоих случаях изогнутая поверхность аппроксимируется 1024 плоскими треугольниками, называемыми вспомогательными треугольниками (sub-triangles).

Файл, содержащий модель, разбивается на слои с помощью ПО. Толщина слоя выбирается исходя из требований к точности изделия и

времени его изготовления в рамках возможностей технологий БПИ и СЛП. На рис. 4.7 представлена модель разбиения на слои при двух толщинах слоев. При относительно толстых слоях (рис. 4.7, а) скорость изготовления изделия увеличивается за счет уменьшения количества слоев, причем относительное ускорение процесса значительно, так как 20 – 50 % времени технологического процесса занимает растилка нового слоя порошка. Относительно тонкие слои увеличивают точность воспроизводства криволинейных поверхностей за счет уменьшения погрешности аппроксимации. На рис. 4.7, б уменьшение толщины слоя в четыре раза привело к уменьшению погрешности во столько же раз.

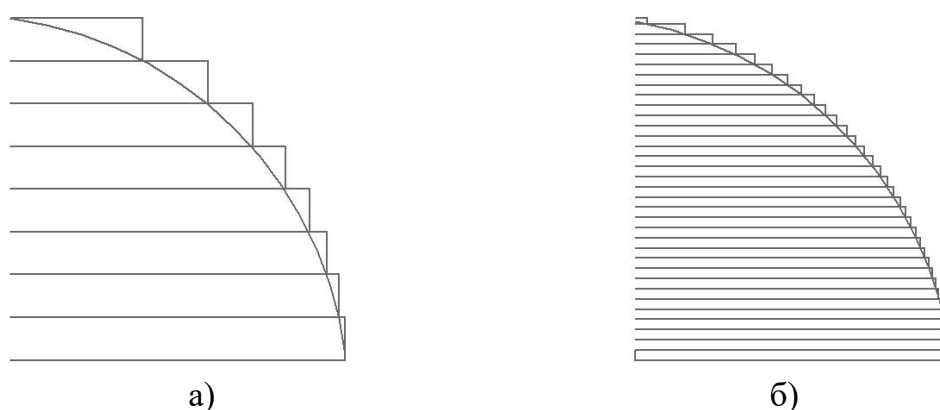


Рис. 4.7. Разбиение модели на слои: а – относительно толстые слои; б – относительно тонкие слои

Преимуществом нового стандарта электронных документов AMF является применение языка разметки XML для записи данных: текстовая запись с учетом синтаксиса языка XML; быстрая обработка файла; распространенное ПО для работы с XML-файлами; расширяемость формата за счет отсутствия привязки к разметке отображения (т. е. существуют широкие возможности расширения описания и представления данных); высокая степень сжатия за счет текстового содержания. Исследования показывают, что AMF-файлы имеют более чем в два раза меньший размер, чем ASCII STL-файлы (рис. 4.8).

Кроме того, новый стандарт с легкостью описывает материал, два и более материала в одном изделии, градиентные материалы и мезоструктуры, причем позволяет создавать виртуальные массивы, использовать арифметические и логические операции при задании геометрии, описывать поверхность (покрытие) и т. п. Перспективными

направлениями расширения формата файлов для БПИ признаны внедрение метрологических характеристик, параметров технологических режимов, данных для контроля процесса, связи с другими деталями сборки, а также предоставление возможности шифрования файла и однозначной идентификации его автора.

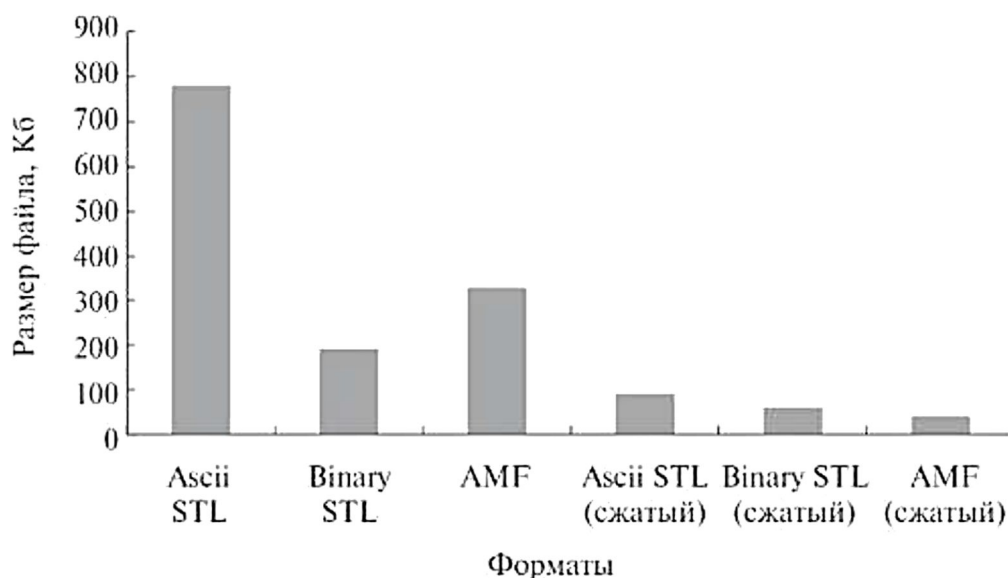


Рис. 4.8. Сравнение размеров файлов форматов STL и AMF

Рассматриваются также варианты внедрения воксельных методов описания модели. После создания и проверки STL-файла можно переходить к подготовке процесса послойного синтеза изделия.

#### ***4.1.2. Этап подготовки процесса послойного синтеза***

Подготовка процесса осуществляется посредством специального программного обеспечения, называемого системами подготовки процесса (process planning software), например, Catalyst EX™, Insight™ («Stratasys Inc.», США), Fab@Home Application («H. Lipson», США). Данный этап является крайне важным с точки зрения обеспечения производительности процесса, точности получаемых прототипов и их механических свойств. Конечная цель данного этапа – формирование управляющей программы для оборудования послойного синтеза. На данном этапе решаются четыре основные задачи:

- ✓ выбор ориентации модели относительно направления формирования слоев;

- ✓ расщепление модели на слои (slicing);
- ✓ моделирование поддерживающих структур;
- ✓ формирование траектории (path generation).

Задача выбора ориентации связана с необходимостью обеспечить максимально возможную производительность процесса при наивысшей точности изделия. При этом выделяют три метода выбора ориентации:

- ✓ ручной метод – выбор необходимой ориентации модели непосредственно пользователем;

- ✓ полуавтоматический, подразумевающий, что пользователь задает определенные границы изменения ориентации, а система подготовки процесса находит оптимальную ориентацию в рамках заданных границ;

- ✓ автоматический – выбор ориентации системой подготовки процесса модели без вмешательства пользователя.

Зачастую выбор конкретного метода определения ориентации модели связан с используемым форматом цифровой модели.

Под задачей расщепления на слои понимают нахождение последовательности параллельных сечений цифровой модели, которые будут являться «блоками» (slab) выращиваемой физической модели и необходимы для дальнейшего расчета траектории формирования модели (стереолитография, сплавление порошков лазером, LOM) либо для формирования матрицы экспозиции (для таких процессов, как Solid Ground Curing, Selective Inhibition Sintering, Photomasking и т. п.).

Формирование поддерживающих элементов («поддержек») в процессе изготовления прототипов связано с необходимостью обеспечить прочность изделия в процессе построения, минимизировать деформации и расслоения.

Формирование траекторий подразумевает разработку кодов, необходимых для управления установкой быстрого прототипирования. При этом учитываются два вида данных:

- ✓ геометрические, включающие в себя информацию о необходимых перемещениях рабочих органов RP-установок;

- ✓ технологические, включающие в себя информацию о режимах работы узлов установки. Например, частота повторения импульсов лазера, скорость перемещений рабочих органов и т. д.



Системы подготовки процессов послойного синтеза с построчной схемой формирования позволяют рассчитывать траекторию формирования слоев с учетом различных стратегий («зигзаг», «эквидистанта», «петля» и т. д.), что может влиять на качество формируемых физических моделей.

#### ***4.1.3. Этап формирования изделий***

Изделие формируется при помощи специального оборудования в соответствии с подготовленной управляющей программой. Различают прямые (direct) и косвенные (indirect) способы формирования изделий. Прямые методы предполагают создание на этапе формирования полностью готового изделия, обладающего всей совокупностью требуемых геометрических и физико-механических свойств. Прямое формирование может дополняться лишь незначительными процедурами постобработки, связанными с повышением качества поверхностей изделия и улучшением их внешнего вида: шпатлевание, полирование, грунтование, окрашивание, покрытие и т. п. Косвенные методы предполагают на этапе формирования создание лишь формы изделия. Обеспечение физико-механических свойств, структуры и прочих характеристик выносится на процесс постобработки.

Во многих методах этап формирования не заканчивается сразу после построения изделия. Зачастую полученная модель должна «вылежаться» в рабочей зоне для обретения требуемых свойств или создания условий для ее извлечения из установки. Примерами может служить остывание модели после селективного лазерного спекания, полное отверждение модели после окончания трехмерной печати на оборудовании Z Corp. и т. д.

#### ***4.1.4. Этап постобработки изделий***

Согласно идеологии непосредственного цифрового производства необходимо стремиться к тому, чтобы операция формирования изделия была единственной и окончательной в технологическом процессе изготовления изделия. Однако часто при послойном синтезе полученные изделия требуют дополнительной обработки. Данный процесс называют постобработкой (postprocessing). Наиболее распространенными видами постобработки являются процессы удаления

поддерживающих структур, термическая обработка, выдержка под излучением, инфильтрация, нанесение покрытий, шпатлевание и механическая обработка. Необходимость использования постобработки обусловливается следующими факторами:

- ✓ созданием дополнительных геометрических элементов на изделии, обязательных для реализации некоторых процессов послойного синтеза или обеспечивающих требуемую точность изделия. К таким элементам относят поддерживающие структуры и «кирпичики» в LOM-технологии. Процесс их удаления может быть как целиком ручным, так и автоматизированным, например, растворение «поддержек» в FDM-технологии;

- ✓ сокращением затрат времени и энергии при формировании изделия путем выноса процессов окончательного закрепления формы и свойств изделия на более эффективную постобработку. Примером может служить выдержка изделий, полученных стереолитографией, под УФ-излучением для полного отверждения фотополимера;

- ✓ обеспечением требуемых свойств изделия, которые не могут быть получены непосредственно при его формировании. К таким процессам относятся инфильтрация пористых изделий, а также термообработка и т. п.;

- ✓ обеспечением требуемой точности изделий, шероховатости поверхностей и внешнего вида изделий путем их последующей механической обработки, шпатлевания, нанесения покрытий.

Следует отметить, что необходимость постобработки не является характерным недостатком различных способов послойного синтеза, а свойственна практически всем процессам изготовления изделий, даже после механической обработки зачастую требуются ручные и слабоавтоматизированные операции удаления заусенцев, полирования, окрашивания и т. п.

## **4.2. Преимущества и недостатки послойного синтеза**

Перечисленные выше характерные черты послойного синтеза обуславливают следующие преимущества по сравнению с традиционными методами формообразования – субтрактивными и формативными:

✓ изделие формируется непосредственно на основе его электронной модели, минуя этапы технологической и организационной подготовки производства;

✓ геометрия однозначно определяет процесс изготовления, т. е. отсутствует многовариантность, присущая разработке технологических процессов для традиционных методов, что исключает влияние человеческого фактора на качество изделия;

✓ сложность формируемых изделий практически не ограничена. Для большинства методов ограничениями по сложности формы являются минимальный размер топологического элемента (в различных технологиях варьируется от единиц микрометров до десятых долей миллиметра) и невозможность получения замкнутых полостей (в некоторых технологиях послойного синтеза такое ограничение отсутствует, например, в процессах ультразвуковой консолидации («Solidica, Inc.», США);

✓ получение окрашенных изделий;

✓ производство сборочных единиц непосредственно в собранном виде;

✓ изготовление изделий с уникальными физико-механическими свойствами (технологии EBM, LENS, DMD и т. п.).

На данный момент области применения послойного синтеза ограничены задачами изготовления уникальных изделий, в то время как в ритмичном производстве эффективность субтрактивных и формативных технологий несоизмеримо выше. Последнее обусловлено целым рядом проблем, свойственных послойному синтезу, из которых в качестве наиболее важных выделяют следующие:

✓ низкая производительность процесса изготовления изделий по сравнению с традиционными методами;

✓ высокая энергоемкость процесса изготовления изделий по сравнению с традиционными методами;

✓ высокая стоимость исходных (строительных) материалов для процессов послойного синтеза;

✓ сложность получения высокоточных изделий;

✓ высокие затраты на производство крупногабаритных изделий;

✓ механические свойства изделий, полученных послойным синтезом, как правило, анизотропны: имеют различные значения в направлении плоскости слоев и в направлении выращивания модели.

### 4.3. Распространенные приемы повышения эффективности процессов послойного синтеза

Наиболее важное направление развития технологий послойного синтеза – это разработка методов повышения производительности и снижения энергоемкости процессов послойного синтеза. Эффективность ПС зависит от скорости формирования отдельных слоев и их количества. В соответствии с этим можно выделить две группы подходов к повышению производительности:

- 1) повышение скорости формирования слоев;
- 2) уменьшение количества формируемых слоев (увеличение их толщины).

Первая группа подходов в целом основана на совершенствовании техники послойного синтеза и реализуется посредством таких решений:

✓ увеличение скорости воздействия на строительный материал, например, увеличение скорости сканирования поверхности порошка лазером при СЛС;

✓ реализация параллельного использования нескольких источников воздействия, например, использование двух лазеров в установках «EOSINT P 700» фирмы «EOS GmbH» (Германия);

✓ замена схемы построчного (line-wise) формирования на послойную (layer-wise), например в технологии Selective Inhibition of Sintering (SIS).

Подобные подходы имеют определенные ограничения, связанные с объективными техническими сложностями и экономической обоснованностью усложнения конструкции установок послойного синтеза.

Повышение производительности послойного синтеза путем уменьшения количества формируемых слоев вступает в противоречие с требованиями к точности модели. Данное противоречие разрешается использованием некоторых специальных приемов на этапе подготовки процесса. На данный момент существует значительное количество подобных приемов, наиболее известные из которых приведены ниже.

### 4.3.1. Формирование изделий с адаптивной толщиной слоя

Базовый способ изготовления прототипов при послойном синтезе называют рассечением на однородные слои (uniform slicing). Он заключается в формировании физических моделей из слоев равной толщины (рис. 4.9, а). При этом с уменьшением толщины слоя повышается точность изделия, но увеличивается количество слоев и соответственно растет время на изготовление. Точность формируемого изделия оценивается величиной отклонения профиля формируемого прототипа от номинального профиля цифровой модели ( $\Delta$ , мм). Причем величина отклонения определяется по формуле

$$\Delta = S_z \cos \varphi = S_z S_{n_z}, \quad (4.1)$$

где  $S_z$  – толщина слоев, мм;  $\varphi$  – угол профиля прототипа;  $n_z$  – компонента  $Z$  нормального вектора  $n$  на рассматриваемом участке поверхности цифровой модели.

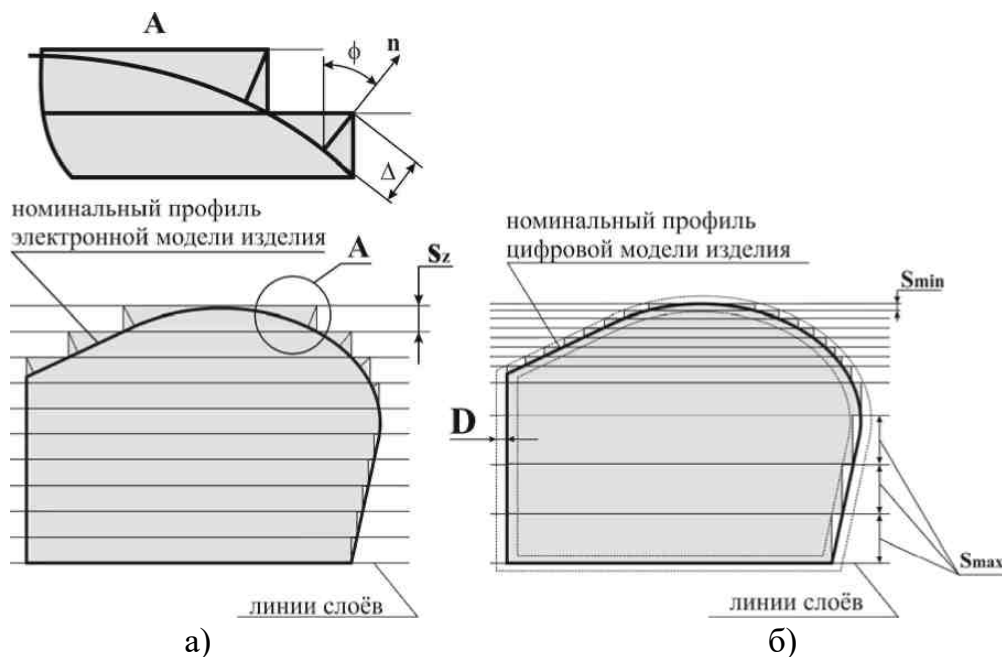


Рис. 4.9. Способы рассечения на слои: а – однородное рассечение (uniform slicing); б – адаптивное рассечение (adaptive slicing)

Из (4.1) следует, что отклонение профиля различно для разных слоев прототипа, на основании чего в 1994 г. А. Доленк (А. Dolenc, Финляндия) предложил формировать прототипы с непостоянной толщиной слоя [58]. Данный метод получил название адаптивного рассечения на слои (adaptive slicing) (рис. 4.9, б). Совместно с

И. Мякела (I. Makela, Финляндия) А. Доленк предложил уравнения для определения толщины каждого слоя [59]:

$$S_{zPi} = \min \left\{ S_{\max}, \frac{\Delta}{n_z} \right\},$$

$$S_z = \max \{ S_{\min}, \min \{ S_{zPi} \} \},$$
(4.2)

где  $S_{zPi}$  – расчетная величина толщины слоя на рассматриваемом участке слоя, обеспечивающая требуемое значение отклонения профиля  $\Delta$ ;  $S_{\max}$  – максимальная толщина слоя, получаемая на данной установке быстрого прототипирования;  $S_{\min}$  – минимальная толщина слоя, получаемая на данной установке быстрого прототипирования;  $S_z$  – искомая толщина слоя.

Дальнейшее развитие идеи адаптивного рассечения на слои получили в работах М. Дж. Уозни (M. J. Wozny) [60], П. Калкэни (P. Kulkarni), Д. Дьютты (D. Dutta) [61], Дж. Тайберга (J. Tyberg), Й. Х. Буна (J. H. Bohn) [58], А. А. Сапрыкина [62]. Э. Сабурин (E. Sabourin) предложил идею локального адаптивного рассечения (local adaptive slicing). Эта идея заключалась в том, что после рассечения по «рекурсивной» методике модель разделяется на внешнюю и внутреннюю области с последующим увеличением толщины слоев во внутренней области (рис. 4.10) [58].

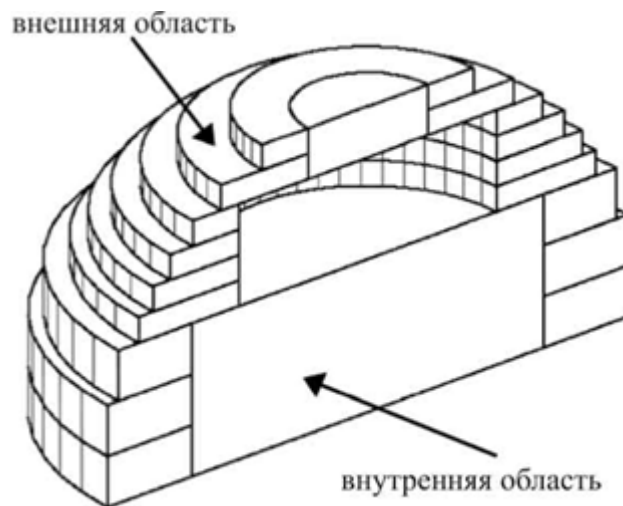


Рис. 4.10. Локальное адаптивное рассечение

Идеи, подобные локальному адаптивному рассечению применительно к селективному лазерному спеканию, развивались также в работах профессора О. С. Сироткина [63] и А. А. Сапрыкина [64]. Адап-

тивное рассечение в настоящее время коммерчески применяется в FDM-технологии. Дж. Тайберг и Й. Х. Бун оценили время изготовления FDM-технологией трех различных моделей (рис. 4.11) с использованием однородного, адаптивного и локального адаптивного рассечения [58]. Результаты оценки показали сокращение времени на изготовление прототипов в некоторых случаях более чем вдвое (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Оценка времени изготовления образцов моделей

| Метод рассечения     | Толщина слоев, мм | Время изготовления       |     |                          |     |                          |     |
|----------------------|-------------------|--------------------------|-----|--------------------------|-----|--------------------------|-----|
|                      |                   | Образец 1 (рис. 4.11, а) |     | Образец 2 (рис. 4.11, б) |     | Образец 3 (рис. 4.11, в) |     |
|                      |                   | ч                        | %   | ч                        | %   | ч                        | %   |
| Однородное           | 0,13              | 11,1                     | 100 | 13,3                     | 100 | 24,1                     | 100 |
| Адаптивное           | 0,13              | 9,8                      | 88  | 9,0                      | 68  | 21,1                     | 88  |
|                      | 0,19              |                          |     |                          |     |                          |     |
|                      | 0,38              |                          |     |                          |     |                          |     |
| Локальное адаптивное | 0,13              | 8,1                      | 73  | 5,6                      | 42  | 13,2                     | 55  |
|                      | 0,19              |                          |     |                          |     |                          |     |
|                      | 0,38              |                          |     |                          |     |                          |     |

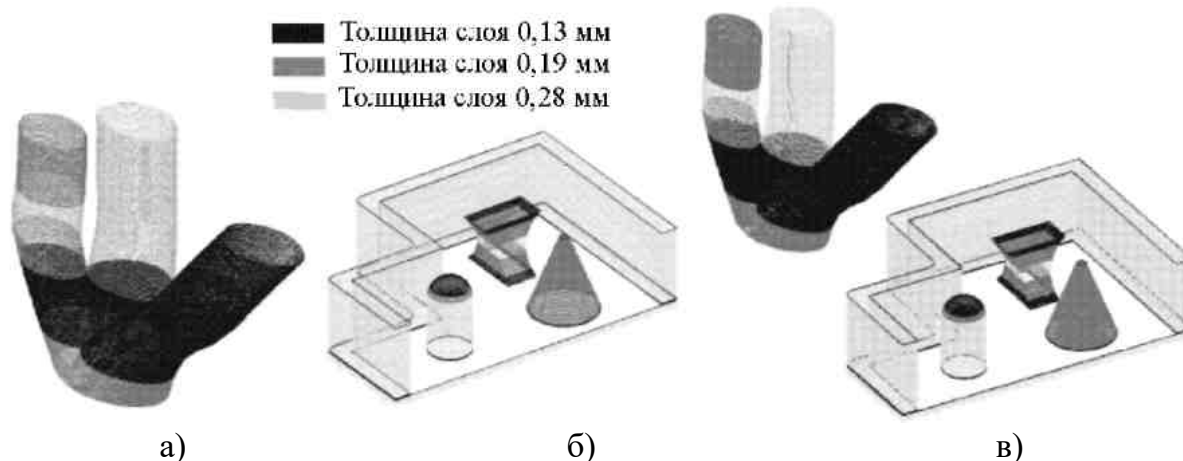


Рис. 4.11. Образцы моделей со слоями, сформированными адаптивным рассечением

Помимо FDM-технологии адаптивное рассечение не получило широкого распространения в связи с тем, что технически ограничены диапазоны изменения толщины слоев, а для ряда технологий варьиру-


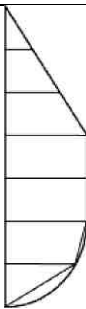
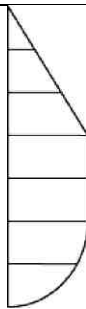

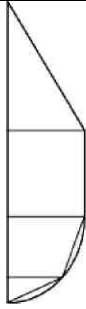
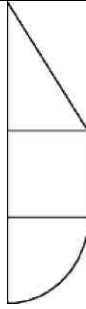
вание последней является невозможным (например, ЛОМ-технология). Для способов, в которых изменение толщины слоев допустимо (например, СЛС-технологии), их варьирование вступает в противоречие с требованиями соблюдения определенных режимов процесса с целью обеспечения качества (минимальные коробления и усадка) и свойств изделий (оптимальная структура материала изделия).

#### 4.3.2. Формирование изделий с аппроксимацией высших порядков

При послойном синтезе изделий боковая поверхность слоя аппроксимирует номинальные поверхности цифровой модели. Согласно классификации, предложенной П. Й. де Яггером (P. J. de Jagger, Нидерланды) [65], в послойном синтезе может применяться аппроксимация нулевого, первого и высших порядков (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Виды аппроксимации поверхностей цифровой модели

| Рассечение | Порядок аппроксимации   |   |   |
|------------|---|---|---|
|            | 0   | 1   | >1  |
| Однородное |  |  |  |
| Адаптивное |  |  |  |

Аппроксимация нулевого порядка – наиболее употребительный метод, применимый для всех видов послойного синтеза. При этом профиль поверхности аппроксимируется отрезками вертикальных прямых или любой другой линией неконтролируемой формы. По



сравнению с данным методом аппроксимация первого и высших порядков обеспечивает уменьшение эффекта ступенчатости и позволяет сокращать количество формируемых слоев при сохранении прежней точности.

Аппроксимация высших порядков успешно применяется в технологиях листового ламинирования, в которых придание формы слоям осуществляется механической обработкой и лазерной резкой: Stratoconception® («CIRTES recherché technologique», Франция), ультразвуковая консолидация («Solidica, Inc.», США), CAM-LEM («CAM-LEM, Inc.», США).

Интересной представляется реализация аппроксимации высших порядков в технологии Freeform Thick Layered Object Manufacturing (FF-TLOM), суть которой заключается в вырезании слоев модели из листового пенополистирола лезвием с изменяемой геометрией (рис. 4.12).

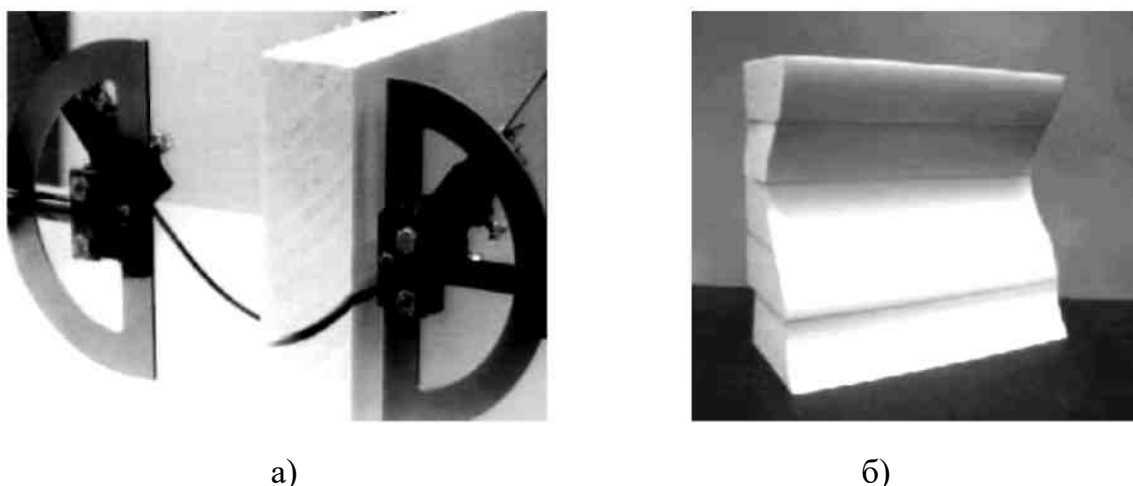


Рис. 4.12. Технология FF-TLOM: а – процесс формирования слоя; б – сформированная модель

В целом послойный синтез с аппроксимацией высших порядков переводит процесс формообразования из 2,5-координатного в (3 – 5)-координатный.

### ***4.3.3. Разнонаправленное рассечение***

Затраты времени на формирование прототипа при послойном синтезе зависят от направления технологической оси. В связи с этим

С. Киан (X. Qian) и Д. Дьютта (США) предложили использовать разнонаправленное рассечение (multiple direction slicing) [66]. Суть данного метода заключается в том, что к установке добавляются две управляемые координаты – вращательные вокруг осей в плоскости, перпендикулярной к оси формирования модели (рис. 4.13).

При этом разные конструктивные элементы изделия формируются с различным направлением технологической оси  $Z$ . Для разделения цифровой модели на различные конструктивные элементы используются цифровые модели форматов, поддерживающих разделение моделей на топологические элементы, например CSG-представление.

Разнонаправленное рассечение позволяет существенно сократить время формирования моделей и снизить эффект ступенчатости, повышая точность изделий и снижая шероховатость поверхностей.

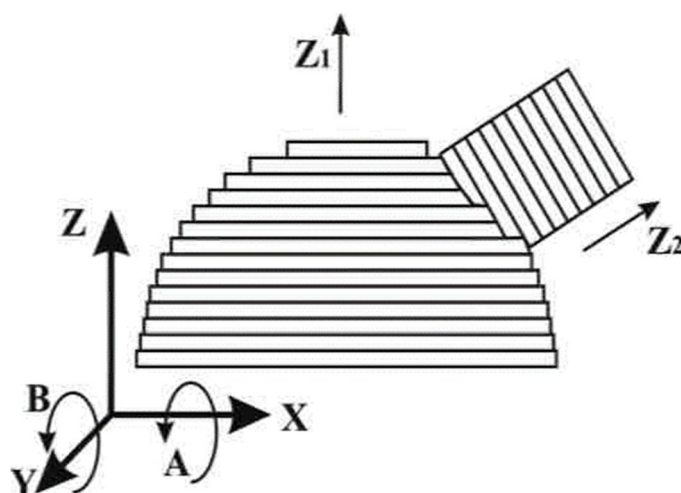


Рис. 4.13. Разнонаправленное рассечение

Наиболее полно данный метод реализован в процессах послойной наплавки и в исследованиях по методам слияния порошковых оснований. Несмотря на ряд преимуществ, разнонаправленное рассечение связано с некоторыми принципиальными сложностями:

- ✓ усложнение оборудования как следствие необходимости введения двух дополнительных управляемых координат;
- ✓ проблемы с обеспечением прочности в местах стыков различных конструктивных элементов модели;
- ✓ необходимость поставлять цифровые модели в представлениях, поддерживающих разделение моделей на топологические элементы.

Помимо технологий послойной наплавки при восстановлении изделий способы разнонаправленного рассеечения в настоящее время коммерческого применения не получили.

### **Контрольные вопросы**

1. Опишите структуру процесса послойного синтеза.
2. Какова последовательность этапов процесса послойного синтеза? Кратко охарактеризуйте каждый из них.
3. Опишите этап подготовки цифровой модели изделия.
4. Опишите этап подготовки процесса послойного синтеза.
5. Охарактеризуйте этап формирования изделий.
6. В чем заключается этап постобработки изделий?
7. Какие правила ориентации фасетов вы знаете?
8. Какие форматы файлов для послойного синтеза вам известны?
9. В чем преимущества и недостатки процесса послойного синтеза?
10. Перечислите основные приемы повышения эффективности процесса послойного синтеза.
11. Какие способы разбиения модели на слои вы знаете?
12. В чем преимущества и недостатки адаптивного рассеечения 3D-модели на слои?

## Глава 5. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТОДАМИ БПИ

Проектирование и конструирование для аддитивного производства – это стремление дизайнеров (конструкторов) создать внешний вид продукта, который использовал бы уникальные возможности БПИ и учитывал специфические технологические ограничения технологий быстрого прототипирования и изготовления, которые будут использоваться для производства проектируемого продукта. Эта задача более широкая, чем простое перепроектирование существующих деталей под процесс изготовления технологиями БПИ. Процесс проектирования для изготовления технологиями БПИ дает такие преимущества, как сокращение используемого объема материала или объединение нескольких деталей в одну. Однако он не учитывает дополнительные преимущества методов БПИ по улучшению формы и повышению функциональности продукта.

Процесс проектирования изделий для быстрого прототипирования и изготовления – это не слепое следование набору правил проектирования и конструирования, а мыслительный процесс, в ходе которого принимаются сознательные решения (часто компромиссные). Поскольку интерес производителей по всему миру к аддитивному производству продолжает расти, важно четко убедиться, что детали разработаны специально для процессов БПИ. Конечно, существуют некоторые области применения, такие как производство запасных частей, в которых ранее традиционно изготовленные компоненты не будут переработаны для БПИ.

Однако есть вещи, которые можно легко выполнить даже с разработанными изделиями, чтобы свести к минимуму время печати и расходы на производство. По сути, более четкая иерархия различных типов процессов проектирования, используемых в спектре аддитивного производства, может различать только изменение параметров процесса производства БПИ и формы детали, но не ее функции, чтобы точнее соответствовать процессу БПИ, и полное изменение формы и функции детали, чтобы стать по-настоящему спроектированной для быстрого прототипирования и изготовления. Как правило, эти три различных подхода называются прямой заменой изделия, адаптацией изделия для БПИ и проектированием изделия для быстрого прототи-

пирования и изготовления (рис. 5.1). Пример этого показан в различных вариантах конструкции коллектора, приведенных на рис. 5.2.

|   |   |   |  |
|---|---|---|--|
| Пространство для конструирования<br>Свобода изменения геометрии | Процесс   | Процесс   | Процесс  |
|   | Прямая замена   | Адаптированные под БПИ  | Конструирование под БПИ  |
|   | Используется в случае, когда абсолютно никакие изменения в детали не допускаются, и деталь должна быть воспроизведена как можно ближе к исходной детали. Основная причина использования этого подхода заключается в изготовлении запасных частей, когда время выполнения заказа достаточно важно, чтобы оправдать использование БПИ | Используется в случае, когда форма детали вносится изменения, часто внутренние, чтобы упростить ее изготовление с помощью БПИ. Внешняя форма изделия также может быть изменена, но ее использование и функция, а также то, как она вписывается в изделие, не имеют значения | Все изделие переработано, чтобы максимально использовать преимущества технологии БПИ. Здесь мы пересматриваем, как изделие вписывается в продукт, что и как она выполняет, и пытаемся улучшить это |
|   | Функция   | Состояние   | Форма  |

Рис. 5.1. Различия в процессе БПИ при прямой замене деталей, адаптацией для БПИ и конструированием для БПИ




|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |    |
| Прямая замена деталей БПИ   | Адаптированные под БПИ  | Конструирование под БПИ  |
| 4,6 кг  | 1,0 кг<br>Снижение массы на 78% (3,6 кг)  | 0,4 кг<br>Снижение массы на 91% (4,2 кг);<br>Улучшение текучести жидкости внутри изделия;<br>Уменьшение габаритов;<br>Упрощение сборки |

Рис. 5.2. Подходы к проектированию коллектора, представленные Марком Сондерсом, Renishaw

## **5.1. Использование технологий БПИ для повышения ценности изготавливаемого продукта**

Как отмечалось ранее, БПИ – это дорогостоящая технология производства, и из-за ее «серийного» метода производства она всегда будет относительно медленной по сравнению с некоторыми традиционными (субтрактивными и формативными) технологиями производства, поэтому, вероятно, останется сравнительно дорогой и в будущем. Поэтому, рассматривая процессы БПИ в качестве технологий для производства деталей, в подавляющем большинстве случаев их следует использовать только в том случае, если они действительно повышают ценность изготавливаемого продукта. Прежде чем приступить к разработке отдельных деталей, инженеры-конструкторы должны проанализировать свой продукт, чтобы определить, какие стратегии повышения добавленной стоимости им следует принять. Это окажет влияние на структуру изделия и конфигурацию деталей. Если затраты оправданы, то можно приступить к проектированию изделий для конкретных процессов БПИ.

## **5.2. Общие правила по проектированию изделий для их изготовления на основе технологий БПИ**

Существует ряд основополагающих принципов проектирования, которые должны быть применены практически к любой форме аддитивного производства.

### ***5.2.1. Правило № 1. Учет конструктивных особенностей изделия и технологических возможностей оборудования***

Существует несколько правил проектирования для процессов БПИ, которые могут быть универсально применены ко всем пространственным геометриям, материалам, технологиям аддитивного производства и классам деталей. Многие параметры конструирования (дизайна) зависят от других параметров дизайна и условий изготовления (печати), поэтому трудно привести точные технологические параметры, которые подошли бы в каждом конкретном случае. По мере того как инженер-конструктор изделий для БПИ приобретает опыт и профессионализм в понимании особенностей процессов аддитивного

производства, он постепенно совершенствуется в проектировании деталей, которые он будет идеально изготавливать на любом оборудовании и на основе любой технологии аддитивного производства.

Примером изменчивости руководящих принципов проектирования является минимальный размер отверстия или щели в детали при ее производстве из полимерного порошка (SLS-технология), который зависит от ее толщины. По мере увеличения толщины детали нерасплавленный порошок в узких отверстиях частично расплавляется, поэтому его удаление становится невозможным. Но различные машины, работающие по SLS-технологии, также производят детали разного качества, поскольку они работают при разных температурах, толщине слоя и параметрах лазерного сканирования. Таким образом, минимальный размер отверстия или щели непосредственно зависит от толщины детали, толщины слоя, ориентации изделия при изготовлении (печати), а также от машины, на которой эти элементы будут изготовлены (рис. 5.3).

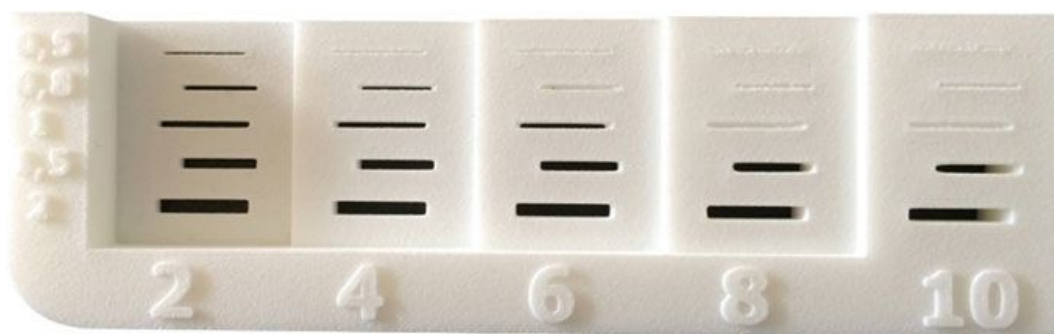


Рис. 5.3. Зависимость размера щели от толщины материала

То же самое относится и к зазорам между движущимися частями. Чем больше площадь поверхности деталей, находящихся в контакте, тем больше должен быть зазор между движущимися частями.

### **5.2.2. Правило № 2. Оценка целесообразности применения технологий БПИ**

Существует бесчисленное множество примеров использования БПИ для изготовления деталей, когда деталь можно было бы изготовить качественнее, дешевле и быстрее, используя ряд других технологий (субтрактивных и формативных). Как правило, если изделие было

спроектировано для обработки на трехосевом станке с ЧПУ, то его обработка на станках с ЧПУ будет дешевле и быстрее, чем производство на основе технологий быстрого прототипирования и изготовления. Хотя, конечно, бывают исключения из этого правила. В частности, использование в производстве технологий БПИ оправдано только в том случае, если изделие не может быть изготовлено с применением других технологий производства. Основной причиной этого является скорость изготовления изделий, которая приводит к повышению затрат. Скорость выпуска изделий на основе технологий БПИ значительно ниже по сравнению почти со всеми другими производственными технологиями, поэтому с точки зрения затрат экономически целесообразно изготавливать геометрически простые изделия с использованием традиционных технологий. Однако, когда сложность изделия достигает такой степени, что оно не может быть изготовлено традиционными технологиями, тогда применение технологий БПИ считается экономически и технологически оправданным (рис. 5.4). В приведенном на рисунке примере детали, имеющие простую геометрическую форму (слева от линии), могут быть легко изготовлены с помощью лазерной и гидроабразивной резки, штамповки, механической обработки с ЧПУ и т. д. Однако изделия с более сложной геометрией, хотя и сходной с описанными изделиями (справа от линии), изготовить перечисленными выше технологическими методами – слишком трудоемкая задача, поэтому использование технологий БПИ для их производства будет целесообразно.

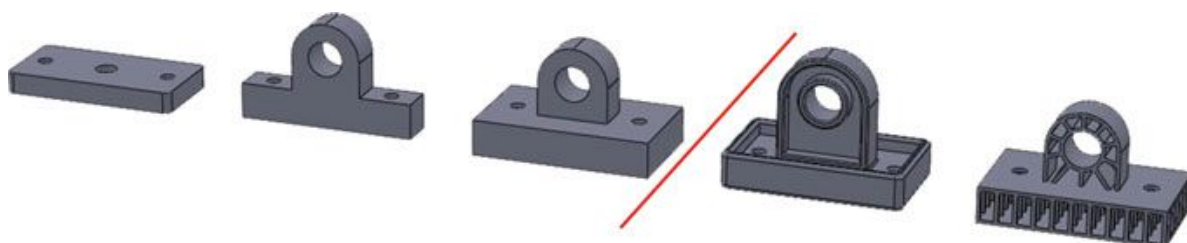


Рис. 5.4. Влияние геометрической сложности изделия на выбор технологии его изготовления

### 5.2.3. Правило № 3. Учет эстетических требований к изделию

Технологические возможности методов БПИ позволяют создавать изделия практически любой формы без ущерба эстетическим показателям разрабатываемого изделия. Эти показатели включают в се-



бя информационную выразительность, рациональность формы, целостность композиции, совершенство производственного исполнения и стабильность товарного вида. Использование этих технологических возможностей методов БПИ позволяет придать изделию уникальный эстетический вид. Также при использовании методов БПИ можно при изготовлении добавить логотипы, инструкции, номера деталей и т. д. Это может упростить сборку и отслеживание запасов, помочь определить марку продукта.

#### ***5.2.4. Правило № 4. Отсутствие острых кромок***

При проектировании изделий для их производства на основе технологий БПИ необходимо минимизировать количество острых углов, кромок и переходов. Это важно по двум причинам:

✓ во-первых, это делает изделие более эргономичным и удобным в удержании и использовании, поскольку устраняет риск получения травмы при наличии острых краев;

✓ во-вторых, снижает количество концентраторов напряжения, которыми являются острые углы, кромки и переходы, что может оказать влияние на прочность изделия.

Внутренние углы, в частности, служат местом концентрации напряжений, поэтому такие углы всегда должны быть скруглены. Добавление скруглений не увеличит конечную стоимость изделия, а, наоборот, уменьшит ее, так как это потребует меньше материала (в среднем на 2 %). Данная экономия возникает вследствие уменьшения количества материала, используемого на «поддержки».

#### ***5.2.5. Правило № 5. Учет ориентации модели на платформе построения***

Качество (прочность, свойства материала, качество поверхности, степень «поддержки» и т. д.) каждого изделия при разных процессах печати напрямую связано с ориентацией изделия на платформе построения. Поэтому инженеру-конструктору необходимо думать о том, в какой ориентации будет производиться конкретное изделие. Ориентация изделия в момент печати определяет направление анизотропии, которое всегда будет находиться в вертикальном направлении (вдоль оси  $Z$ ). Таким образом, если анизотропия является важным

фактором, то изделие должно быть ориентировано таким образом, чтобы элементы, требующие максимальной прочности, изготавливались (печатались) горизонтально. Если к отклонениям формы (например, к округлости отверстий) также предъявляются жесткие требования, то изделия лучше изготавливать (печатать) в вертикальной ориентации. Отверстия, напечатанные горизонтально, будут ступенчатыми и слегка эллиптическими. Общая высота сборки определяет количество слоев материала и, следовательно, сколько времени потребуется для изготовления (печати) изделия, что оказывает влияние на время изготовления и, как следствие, на конечную стоимость производимого изделия. Если нет других важных требований или они равнозначны, то наилучшей ориентацией изделия на платформе построения будет та, которая минимизирует общую высоту изделия или сборки. На рис. 5.5 показаны некоторые различия в качестве деталей при их изготовлении (печати) при различных ориентациях изделия на платформе построения при плавлении слоя полимерного порошка с применением SLS-технологии.

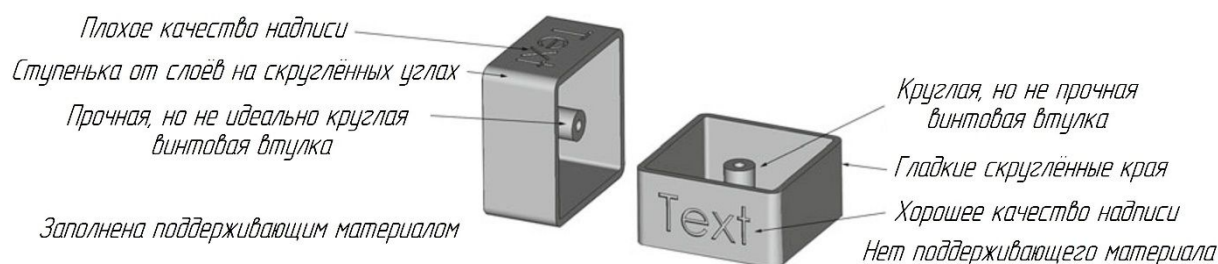


Рис. 5.5. Некоторые эффекты печати детали в двух разных ориентациях

### **5.2.6. Правило № 6. Минимизация количества используемого материала**

Излишнее добавление материала в изделие вызовет его значительное удорожание и возникновение больших остаточных напряжений при изготовлении. Любое количество материала, которое нарушает правило равномерной (требуемой) толщины без веских причин, является лишь его необоснованной тратой, приводящей к повышению стоимости производства изделия, появлению больших остаточных напряжений, и, следовательно, требует большего количества материала «поддержки», а также более интенсивной термообработки. Например, при обработке на станках с ЧПУ нецелесообразно удалять боль-

шие объемы материала, если это не влияет на функциональные свойства изделия, что позволяет избежать дополнительных затрат по их обработке. При использовании технологий БПИ данный процесс выглядит наоборот, поскольку любой излишний (избыточный) материал изделия увеличивает время и стоимость его изготовления, чего следует избегать.

### **5.2.7. Правило № 7. Минимизация объема материала «поддержки»**

Ориентация изделия на платформе построения при изготовлении (печати), описанная в правиле № 5, определяет, где потребуется материал «поддержки» для поддержания нависающих частей конструкции (выступов, перемычек и др.), а также обеспечения требуемого теплоотвода от поверхности строящегося изделия. Таким образом, расположение материала «поддержки» всегда служит ключевым фактором при проектировании:

$$\begin{aligned} \text{Материал «поддержки»} &= \text{Трудозатраты} = \text{Стоимость} \\ \text{Материал «поддержки»} &= \text{Качество детали} \end{aligned}$$

Большинство технологий БПИ требуют использования материала «поддержки». Поскольку размещение и количество вспомогательного материала влияют на качество изделия и стоимость его последующей обработки, использование вспомогательного материала должно быть тщательно учтено в процессе проектирования. Конструирование обеих частей (изделия и «поддержки») и ориентация изделия на платформе построения при изготовлении (печати) влияют на количество и расположение материала основного изделия. Если материал «поддержки» размещен неправильно, его удаление может быть очень трудоемким процессом, а в некоторых случаях приводит к повреждению изделия в местах его контакта с «поддержкой».

## **5.3. Проектирование конструкций, позволяющих избежать анизотропии**

Одно из правил конструирования изделий для изготовления с применением технологий БПИ касается принятия решений об ориентации печати модели на платформе построения. Одной из главных

причин этого является возможность появления анизотропии свойств изделий. Анизотропия – разница в механических свойствах изделия в вертикальном направлении – может быть ахиллесовой пятой технологий БПИ (рис. 5.6). Степень анизотропии в вертикальном ( $Z$ ) направлении для различных технологий БПИ приведена в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Степень анизотропии в вертикальном направлении для различных технологий БПИ

| Технология  | Влияние анизотропии в вертикальном ( $Z$ ) направлении  |
|---|---|
| Моделирование методом послойного наплавления (FDM-технологии)   | Очень высокое   |
| Фотополимеризация   | Среднее   |
| Сплавление порошков полимерных материалов в сформированном слое   | От среднего до минимального в зависимости от толщины слоя   |
| Сплавление порошков металла в заранее сформированном слое и другие технологии БПИ с использованием металлов | Минимальное и может быть устранено путем термической обработки или другой последующей обработки, такой как горячее изостатическое прессование (ГИП) |

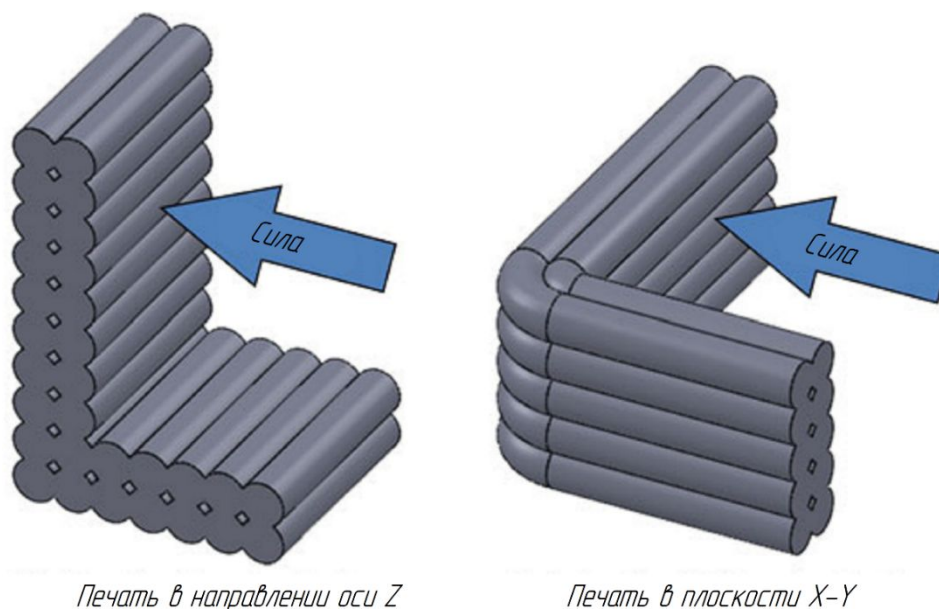


Рис. 5.6. Анизотропия свойств изделия, полученного FDM-технологией. Различная ориентация изделия на платформе построения приводит к разной ориентации слоев, которые будут по-разному реагировать на воздействие нагрузки

Левая скоба (см. рис. 5.6) была бы менее прочной в направлении действия силы, в то время как правая – значительно прочнее из-за ориентации изделия на платформе построения при изготовлении (печати). При проектировании отдельного компонента изделия полезно иметь представление о его ориентации в составе всего узла, в который он будет встроен, чтобы его можно было спроектировать с оптимальным количеством элементов, которые будут подвергаться воздействию больших усилий, ориентированных в плоскости  $X - Y$ .

#### 5.4. Экономический аспект аддитивного производства

Одним из наиболее острых вопросов является экономический аспект применения технологий БПИ, а именно то, что с применением технологий БПИ можно производить более дешевые изделия по сравнению с классическими технологиями обработки материалов. Это утверждение справедливо лишь в редких случаях; в целом это дорогая и низкопроизводительная технология, которую рекомендуется использовать для производства только в том случае, если она добавляет конечному продукту достаточную ценность сверх той, которую можно было бы добавить при классическом производстве.

График, изображенный на рис. 5.7, наглядно иллюстрирует, что при классическом производстве затраты снижаются по мере увеличения количества производимой продукции, в то время как при использовании технологий быстрого прототипирования и изготовления затраты остаются относительно постоянными.

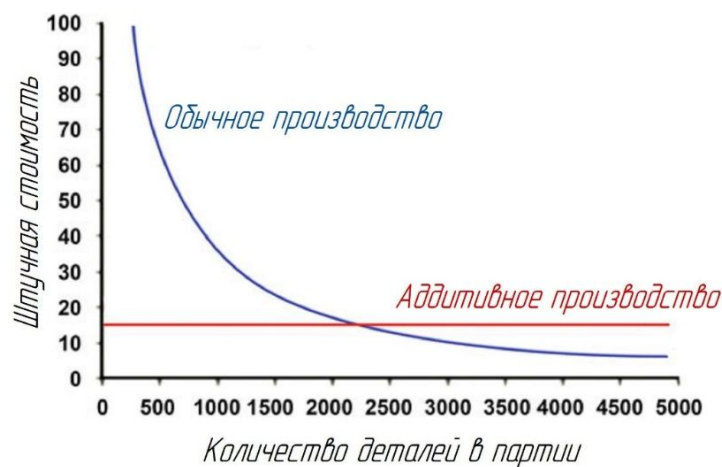


Рис. 5.7. График изменения затрат на производство по мере увеличения количества выпускаемых изделий

Многие неверно трактуют горизонтальную линию на графике как указание на то, что БПИ-технологии дешевле, чем технологии классического производства.

Считается, что аддитивное производство во многих отраслях промышленности можно использовать для замены традиционных производственных технологий, которые применяются в настоящее время без перепроектирования (переконструирования) изделий и компонентов. Это всегда ошибка, поскольку ни одно из преимуществ, предлагаемых технологиями БПИ, не используется. Производимое изделие, которое было разработано, например, для трехосевой обработки на станках с ЧПУ, как правило, дороже изготавливать с помощью технологий БПИ, так как, вероятно, все равно потребуется последующая постобработка на станках с ЧПУ для придания этому изделию требуемого качества поверхности, которое невозможно получить с помощью одних только технологий БПИ.

Для обеспечения максимального качества изготовления изделий с применением технологий БПИ детали должны быть разработаны для аддитивного производства. Почему же конструирование изделий непосредственно для аддитивного производства является важной задачей? Для этого есть много причин, в том числе использование преимуществ функциональной и эстетической ценности, что позволяет повысить геометрическую сложность практически бесплатно. Однако самая веская причина – экономическая.

Далее рассматриваются некоторые экономические аспекты применения технологий быстрого прототипирования и изготовления. Хотя в качестве примера используется технология спекания металлических порошковых материалов, поскольку она наиболее чувствительна к времени изготовления (печати) и последующей обработке, содержание данного подраздела применимо ко всем другим технологиям БПИ. Аддитивное производство компонентов или инструментов, которые не были специально разработаны для изготовления с применением технологий быстрого прототипирования и изготовления, может быть дорогостоящим при их изготовлении из металла. Причины этого просты: металлические системы аддитивного производства дороги, а скорость изготовления деталей низкая. Система аддитивного производства изделий из металла, как правило, стоит от 500 000 до 1 500 000 дол. США.

Оптимистично можно предположить, что машина по производству изделий из металла будет работать примерно 80 % времени, т. е. около 7000 ч в год, 20 % времени отводится на техническое обслуживание, очистку и подготовку машины, снятие деталей и т. д. Обычный срок окупаемости в промышленности для возмещения затрат на инвестиции в инфраструктуру составляет два года. Некоторые компании используют более длительный срок окупаемости, но поскольку машина аддитивного производства относится к области технологий, которая быстро развивается, два года составляет оптимальный срок окупаемости. Кроме того, для инвестиций в оборудование аддитивного производства может быть предоставлен кредит с процентной ставкой, например, 5 %. Существуют также другие связанные с этим затраты, такие как затраты энергии и рабочей силы на настройку машины, но они относительно незначительны по сравнению с почасовой стоимостью работы машины.

*Почасовые эксплуатационные расходы машины = (стоимость покупки машины + проценты)/(срок окупаемости × % времени работы × годовые часы).*

В табл. 5.2 приведены примеры зависимости стоимости почасовой эксплуатации машины от ее рыночной стоимости.

Таблица 5.2

Зависимость стоимости почасовой эксплуатации машины от ее рыночной стоимости

| Стоимость покупки машины,<br>дол. | Почасовая стоимость эксплуатации<br>машины, дол./ч |
|-----------------------------------|--|
| 500 000                           | 37,45  |
| 650 000                           | 48,69  |
| 1 000 000                         | 74,91  |
| 1 200 000                         | 89,89  |

Из таблицы видно, что типичные почасовые эксплуатационные расходы использования машины аддитивного производства металлических изделий могут варьироваться от 37 до 97 дол. США в час (в зависимости от стоимости оборудования). Для приведенных расчетов воспользуемся средней стоимостью эксплуатации в размере 65 дол. США в час. Обратите внимание, что приведенный расчет является

чрезвычайно упрощенным и может включать в себя множество других факторов, например, накладные и другие расходы. Это означает, что если время изготовления (печати) одной детали составляет 10 ч, то стоимость машинного времени для этого изделия составит 650 дол. Однако с «металлическими» аддитивными технологиями, особенно когда детали не были оптимизированы для аддитивного производства, время печати часто значительно превышает это значение и нередко составляет 40, 60 или даже более 100 ч. Например, для одного изделия с временем изготовления (печати), равным 100 ч, стоимость составит 6 500 дол. Стоимость обработки на станке с ЧПУ может быть в том же ценовом диапазоне, что и использование «металлических» аддитивных технологий, и, таким образом, иметь сопоставимые почасовые эксплуатационные расходы. Разница в том, что типовая «простая» деталь может быть обработана на станках с ЧПУ за гораздо более короткое время, чем это может быть сделано с применением систем аддитивного производства. По сравнению с применением машин для литья под давлением в аналогичном ценовом диапазоне разница еще более велика. Время литья детали под давлением, как правило, составляет от доли секунды до нескольких секунд.

Другая затрата на производство деталей с применением технологий БПИ – это сырье. Для порошков алюминия и стали цены, как правило, составляют от 30 до 90 дол. за килограмм, в то время как на другие сплавы, такие как кобальт, хром и титан, могут достигать 300 дол. за килограмм. При использовании «металлических» аддитивных технологий требуется материал «поддержки» для изготовления выступов и свесов, а также необходимо закрепить деталь на платформе построения и отводить тепло с ее поверхности. Обычно это означает, что потери материала составляют около 10 %, включая материал «поддержки» и частично спеченные частицы порошка, которые отбрасываются в процессе просеивания. Эти материальные затраты по сравнению с вышеуказанными затратами на оборудование относительно невелики.

В дополнение к прямым затратам на оборудование при использовании «металлических» аддитивных технологий часто возникают значительные затраты на постобработку: они включают время, необходимое для термообработки детали, снятия детали с платформы построения, удаления материала «поддержки», а также придания ей тре-



буемого качества поверхности. В отчете Wohlers за 2018 г. приводятся сведения, полученные от поставщиков услуг по производству изделий на основе аддитивных технологий и касающиеся вопроса о том, какой процент их затрат на производство изделий приходится непосредственно на изготовление (печать) по сравнению с предварительной и последующей обработкой. Результаты опроса приведены в табл. 5.3. Такие компании, как Daimler, Premium Aerotec, EOS и Materialise, подсчитали, что до 70 % стоимости изделий может быть потрачено на предварительную и последующую обработку.

Таблица 5.3

Относительные расходы на производство изделий методами БПИ, %

| Этап производства                            | Металл | Полимер | Металл и полимер |
|--|--------|---------|------------------|
| Предварительная обработка                    | 13,2   | 10,9    | 10,0             |
| Постобработка                                | 31,4   | 20,2    | 27,0             |
| Предварительная обработка плюс постобработка | 44,6   | 31,1    | 37,0             |
| Изготовление (печать)                        | 55,4   | 68,3    | 63,0             |

Даже по самым скромным подсчетам 45 % затрат при производстве изделия приходится на предварительную и последующую обработку; стоимость изделия со временем изготовления 100 ч вырастает до 12 000 дол. В настоящее время ведутся разработки, которые позволят минимизировать как непосредственное время изготовления (печати), так и время последующей обработки. Далее будут описаны способы минимизации времени изготовления (печати) и последующей обработки на основе «металлических» аддитивных технологий, поскольку именно в этом методе БПИ описанные факторы оказывают наиболее явное влияние. Однако при использовании других технологий БПИ способы по минимизации затрат стоимости изделий будут носить схожий характер.

### ***Влияние конструктивных особенностей изделия на этапы процесса аддитивного производства***

При производстве изделий из металла существуют некоторые факторы, требующие времени и, следовательно, затрат, на которые не влияют конструктивные особенности изделия. Примером этого явля-

ется время нанесения слоя порошкового материала. Время нанесения слоя порошкового материала – это время, необходимое системе аддитивного производства для нанесения нового слоя порошкового материала, прежде чем начнется лазерное воздействие и спекание частиц материала. Типичное время нанесения слоя порошкового материала составляет около 4 – 15 с на слой в зависимости от используемой машины. В табл. 5.4 показаны этапы изготовления изделий из металла на основе технологии БПИ, а также указано, зависят ли они от конструктивных особенностей изделий.

Таблица 5.4

Влияние конструктивных особенностей изделия на этапы процесса аддитивного производства

| Этап процесса аддитивного производства   | Зависимость от конструкции |
|--|----------------------------|
| <b>Предварительная обработка</b>   |                            |
| Проверка качества файлов и при необходимости их исправление                    | Нет                        |
| Подготовка задания на печать в программном обеспечении на платформе построения | »                          |
| <b>Изготовление (печать)</b>   |                            |
| Очистка и подготовка системы БПИ   | Нет                        |
| Продувка системы (откачка кислорода)   | »                          |
| Предварительный разогрев системы БПИ   | »                          |
| Печать изделия:  |                            |
| – нанесение слоя порошкового материала   | »                          |
| – лазерная обработка контура   | Да                         |
| – лазерная штриховка   | »                          |
| – снятие платформы построения с машины   | Нет                        |
| – переработка порошка  | »                          |
| <b>Постобработка</b>   |                            |
| Снятие термических напряжений  | Да                         |
| Удаление детали с платформы построения   | Нет                        |
| Горячее изостатическое прессование (ГИП)                                       | »                          |
| Удаление «поддержек»   | Да                         |
| Термическая обработка  | »                          |
| Обработка поверхностей дробеструйной или пескоструйной обработкой и т. д.      | Нет                        |
| Визуальный контроль  | »                          |

Используя среднее значение, например 8 с, если высота детали составляет 100 мм, а толщина слоя – 50 мкм, деталь будет содержать 2000 слоев, и, следовательно, общее время нанесения слоев порошкового материала составит 16 000 с, или около 4,5 ч, что при средней стоимости часа работы машины выше 65 дол. составит около 290 дол. Однако время нанесения слоя порошкового материала не является фактором, на который влияют конструктивные особенности изделия (кроме уменьшения высоты детали), поскольку «хорошо» и «плохо» спроектированные изделия одинаковой высоты будут иметь одинаковое количество слоев для нанесения.

То же самое относится и к времени продувки машины. Машины аддитивного производства изделий из металла изготавливают детали в атмосфере инертного газа (обычно аргона или азота), а время продувки – это время, необходимое для удаления кислорода из камеры построения. Это может занять от 10 мин до 2 ч в зависимости от машины. Некоторые машины также требуют нагрева камеры или платформы построения, и это тоже занимает определенное количество времени. Опять же время, необходимое для этих двух процессов, требует времени и денег, но не зависит от качества конструкции изделия.

## **5.5. Конструирование с целью минимизации времени изготовления**

Основным фактором, который можно контролировать в процессе конструкторской проработки изделия и который определяет время его изготовления, является количество порошкового материала, необходимого для нанесения и расплавления при формировании каждого слоя изделия. Большинство машин для «металлических» аддитивных технологий работают за счет последовательного расплавления нанесенного порошкового материала, при котором энергетический луч «рисует» каждый кусочек модели на порошке, чтобы расплавить его. В аддитивном производстве это называется контурными линиями и штриховыми «узорами». Процесс формирования слоя путем воздействия на него энергетическим лучом имеет тот же принцип, что и при рисовании карандашом на бумаге закрашенного квадрата. Сначала мы рисуем ребра квадрата – внешние контурные линии, а затем штрихуем карандашом вперед-назад несколько сотен раз область внутри ребер квадрата, чтобы ее закрасить. Это означает, что чем бо́льшую

площадь поверхности необходимо заштриховать (заполнить), тем большее расстояние должен пройти энергетический луч и тем больше времени требуется для создания каждого сечения изделия (рис. 5.8).

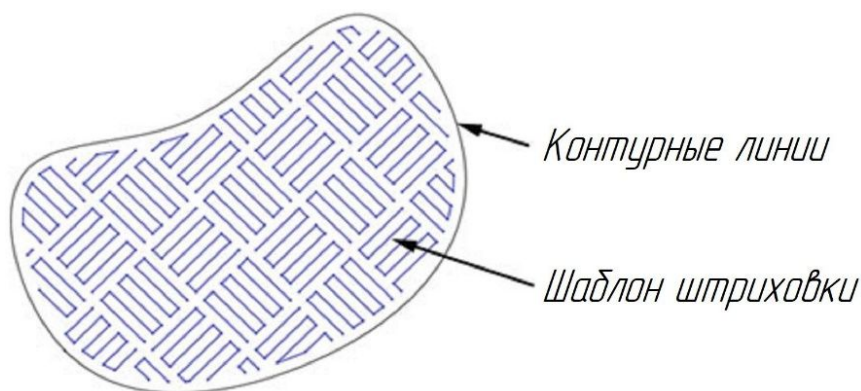


Рис. 5.8. Контурные линии и шаблоны штриховки, которые многие системы АП используют для затвердевания или осаждения материала

В качестве примера возьмем гидравлический коллектор, показанный на рис. 5.9. Он спроектирован для изготовления на станках с ЧПУ и представляет собой монолитный прямоугольный параллелепипед, внутри которого просверливается множество отверстий, образующих соединительные каналы, по которым может перемещаться жидкость. Если бы было необходимо изготовить данный коллектор с использованием технологий БПИ, то любое сечение коллектора представляло бы собой «заполненный» прямоугольник с расположенными внутри несколькими отверстиями.

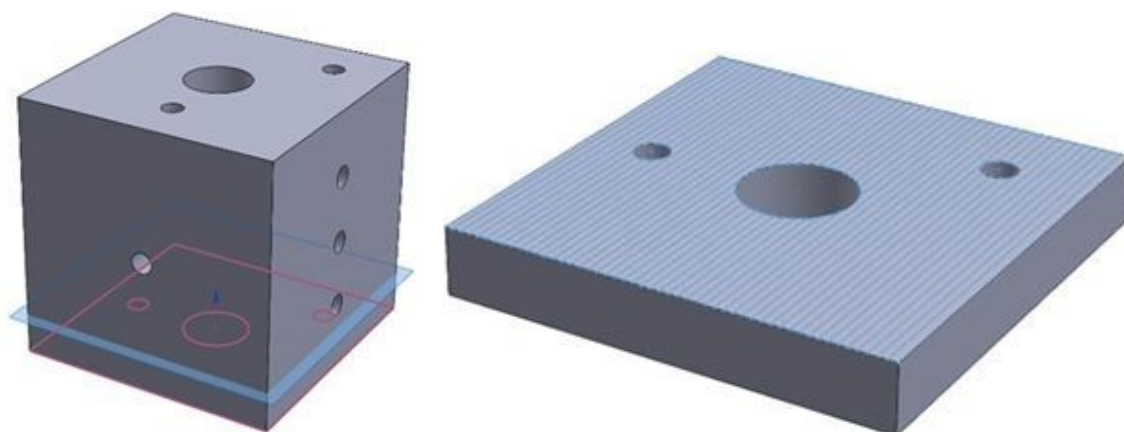


Рис. 5.9. Схема сканирования слоя (светлые полосы) монолитно спроектированного коллектора

Длина траектории сканирования энергетического луча для приведенного выше сечения составит достаточно большую величину. Если размеры сечения коллектора, например, составляют  $100 \times 100$  мм, а расстояние между линиями «штриховки» будет установлено, например, 0,1 мм, то для каждого прямоугольного сечения длина траектории составит примерно 100 м, чтобы охватить как контурные линии, так и штриховку внутри. Это потребует больших затрат времени, которые увеличат стоимость конечного изделия. Если энергетический луч движется со скоростью 330 мм/с, то для «штриховки» этого сечения модели потребуется 300 с, или 5 мин, или 5,41 дол. за сечение при средней стоимости часа работы станка 65 дол.

Цена около 5 дол. за сечение может казаться достаточно привлекательной, однако, если толщина слоя, например, будет равна 50 мкм (что будет считаться относительно большой толщиной слоя), то для изготовления данного изделия потребуется 2000 слоев, таким образом, только цена за время сканирования детали лазером составит 10 820 дол.

### ***Использование оболочковых форм для сокращения времени изготовления***

Напротив, если та самая деталь будет иметь оболочковую форму (это означает, что основная часть материала будет удалена изнутри детали и оставлена только заданная толщина стенки), длина траектории сканирования энергетического луча значительно сократится, что приведет к сокращению времени печати и уменьшению стоимости изделия. Например, если толщина оболочки равна 2 мм и будут использованы указанные выше параметры «штриховки» (сканирования), то общая длина траектории сканирования составит всего около 4,5 м для каждого сечения детали. Это уменьшение длины траектории сканирования более чем на 95 % по сравнению с монолитной моделью. Если лазер движется со скоростью 330 мм/с, то теперь для «штриховки» этого сечения модели потребуется всего 13,6 с, а стоимость машинного времени составит 0,24 дол. (рис. 5.10).

Когда изделие будет полностью изготовлено, его внутренние полости будут заполнены порошком, который можно оставить там, если масса изделия не является строго регламентированной.

Если к массе детали предъявляются строгие требования, то для удаления порошка из внутренних полостей выполняется технологическое отверстие (одно или несколько), через которое удаляется порошок, а отверстие заваривается (запаивается). Внутренняя часть изделия (нависающие элементы конструкции) также будет иметь «поддержки», но их можно оставить, если они не влияют на функциональные характеристики изделия.

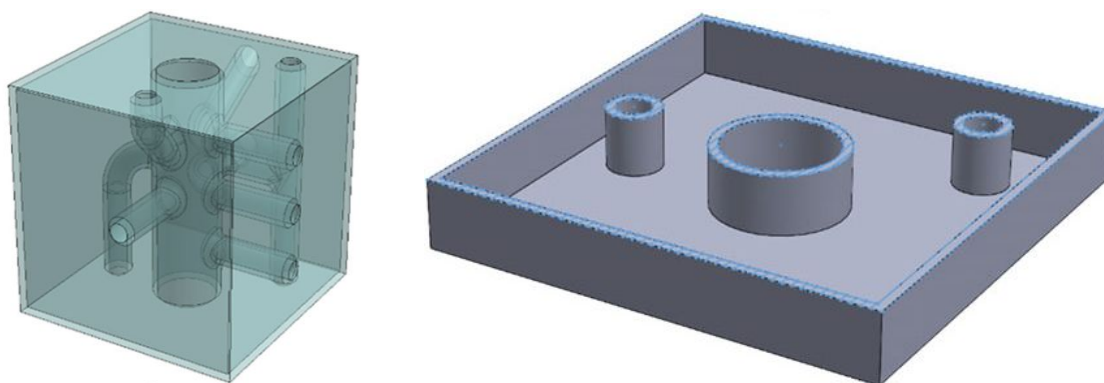


Рис. 5.10. Схема «штриховки» слоя коллектора (светлые полосы), спроектированного оболочкой

Необходимо отметить, что описанный подход к проектированию изделий для изготовления технологиями БПИ очень важен и позволяет соблюдать одно из правил проектирования для процессов БПИ – минимизация количества используемого материала.

Помимо финансовых затрат большие объемы материала, как правило, не дают больших инженерных преимуществ, а могут нанести вред, поскольку это будут те области, где возникнет высокая концентрация остаточных напряжений, которые могут вызвать деформацию детали, и, как показано выше, при аддитивном производстве они также значительно увеличивают время изготовления (печати) изделия. Кроме описанного выше подхода к уменьшению массы изделия с помощью использования оболочковых форм существуют и другие: замещение объема материала монолитных деталей сотовыми и решетчатыми структурами, а также создание пористого материала. В этом отношении логика аддитивного производства противоположна той, которая используется в субтрактивном производстве. Например, при обработке на станке с ЧПУ мы стремимся свести к минимуму количество срезаемого (удаляемого) материала с заготовки, чтобы свести к минимуму затрачиваемое машинное время. При использовании

технологий БПИ чем меньше материала содержит спроектированное изделие, тем быстрее оно может быть изготовлено, приводя к уменьшению общих затрат.

Важно понимать, что время «штриховки» для каждого слоя – не единственный фактор, влияющий на время изготовления (печати). Другие факторы включают время, необходимое для нанесения нового слоя порошка поверх предыдущего, и время предварительного подогрева нанесенного слоя порошка. На уменьшение влияния этих факторов большее воздействие окажет уменьшение высоты изделия, а не его конструктивные особенности. Чем больше изделие в вертикальном направлении, тем больше слоев оно будет содержать и потребуются больше времени для выполнения указанных действий, а значит, и для изготовления печати.

С точки зрения уменьшения чистого машинного времени на изготовление изделий лучше всего изготавливать их при такой ориентации на платформе построения, в которой они будут иметь наименьшую высоту. Но поскольку ориентация изделия на платформе построения при изготовлении также оказывает влияние на физико-механические свойства детали, точность геометрии, качество поверхности, сложность удаления материала «поддержки», то его ориентация является компромиссной с учетом влияния всех описанных факторов.

## **5.6. Проектирование с учетом минимизации последующей обработки**

Одной из важных целей при проектировании изделий для производства с применением технологий БПИ является сокращение количества материала «поддержки», используемого при изготовлении изделий. Как упоминалось выше, материал «поддержки» применяется для поддержания нависающих элементов конструкции и отвода тепла от изготавливаемого изделия. Как правило, для любого элемента конструкции, отклоняющегося от вертикали более чем на определенный угол (этот угол варьируется в зависимости от того, какой материал используется для изготовления), потребуются «поддержки». В некоторых случаях использование дополнительной «стенки» или ребер жесткости в конструкции изготавливаемого изделия поможет избе-

жать использования «поддержек», а также повысить прочность изделия. В частности, важно избегать использования «поддержек» в любых внутренних полостях изделий, например внутри каналов в описанном выше коллекторе, поскольку эти «поддержки» будет трудно или невозможно удалить, что изменит функциональные свойства изделия. Общая концепция проектирования изделий для их изготовления с применением технологий БПИ, позволяющая уменьшить или сократить время последующей обработки, включает в себя решение следующих вопросов:

1. Сокращение изделия только до тех частей, которые позволят ему оставаться функциональным. Все то, что нарушает «правило равномерной толщины» – это ненужный материал, который увеличивает стоимость изделия, вызывает большие остаточные напряжения и, следовательно, требует дополнительных «поддержек» и термообработки.

2. Решение того, как эти характеристики могут быть объединены вместе или нахождение компромисса в их использовании.

3. Использование необходимой ориентации изделия на платформе построения при его изготовлении.

4. Создание с помощью специального программного обеспечения нескольких вариантов «поддержек» для выбора наиболее оптимального.

5. Необходимо:

✓ оценить возможность замены генерируемых «поддержек» постоянными «стенками» или ребрами жесткости. Материал «поддержки» можно рассматривать как временную «стенку» или ребро жесткости, которые будут удалены после изготовления изделия; в связи с этим следует рассмотреть возможность замены «поддержек» на постоянные элементы изделия, не требующие удаления и последующей обработки;

✓ рассмотреть возможность изменения углов наклона отдельных конструктивных элементов изделия, требующих «поддержек». Если элемент расположен горизонтально, под ним потребуются «поддержка». Если есть возможность изменить угол его ориентации, сделать фаску или добавить ребро жесткости под углом  $45^\circ$  относительно горизонтальной поверхности, не нарушая функционала изделия, то это позволит избежать необходимости использования материала «поддержки».



б. Выполнять пп. 1 – 4 до тех пор, пока не будет достигнуто минимальное количество «поддержек».

Далее рассмотрим общий пошаговый процесс конструирования изделий на основе описанной выше концепции, который может быть использован при перепроектировании вышеупомянутого монолитного стального коллектора размерами 100×100×100 мм для его изготовления на основе применения технологий БПИ. Процесс проектирования начинается с упрощения первоначальной конструкции «блока» (монолита) путем устранения всех просверленных отверстий, которые являлись технологическими и впоследствии были заблокированы заглушками (т. е. все отверстия, которые не выполняли никакой функциональной нагрузки). Нам необходимо максимально простое представление «блочного» коллектора только с реальными каналами для транспортировки жидкости. На этом этапе также можно сгладить некоторые места соединения каналов с помощью добавления радиусов скругления, чтобы сделать поток жидкости более плавным, чем это могли бы обеспечить исходные прямые просверленные отверстия (рис. 5.11).

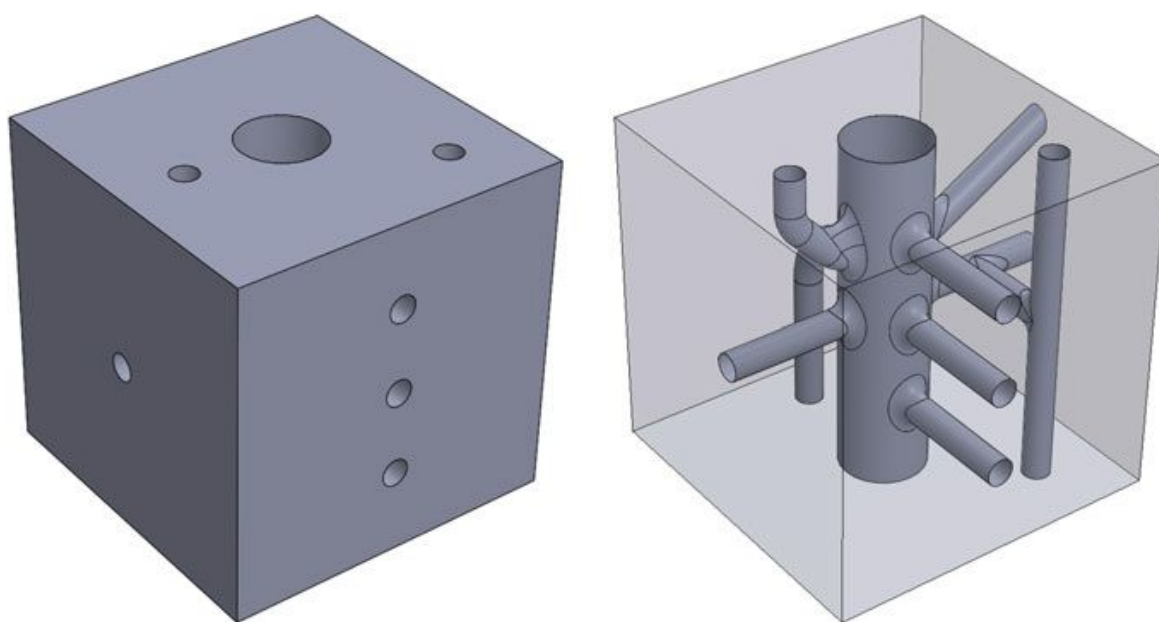


Рис. 5.11. Упрощенный коллектор монолитной конструкции, имеющий только необходимые входные и выходные каналы (стенки каналов имеют «нулевую» толщину)

После упрощения соответствующим образом конструкции «блока» следующим шагом будет удаление всего лишнего материала

«наружного куба», чтобы оставить только трубы, образующие каналы коллектора. Другими словами, мы оставляем только необходимые геометрические элементы, которые наделяют деталь функциональными свойствами. Большинство пакетов программного обеспечения САПР имеют функцию «оболочка», которая позволяет удалять грани геометрических примитивов, оставляя только оболочку с заданной толщиной стенки. В нашем примере мы выбираем все шесть внешних граней куба, которые нужно удалить, оставляя только внутреннюю структуру каналов, например, толщиной 2 мм (рис. 5.12).

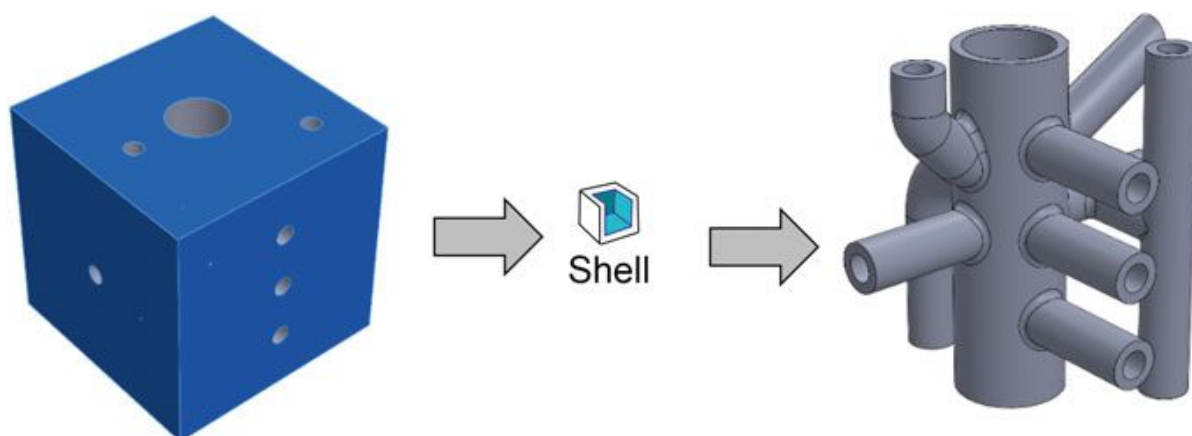


Рис. 5.12. Преобразование конструкции коллектора посредством применения операции «Shell» (оболочка) из монолитной конструкции в оболочковую

Кроме того, теперь, когда можно лучше визуализировать коллектор в целом, необходимо решить, можно ли улучшить его функциональность, например, изменив форму или вид некоторых каналов, которые в настоящее время располагаются горизонтально, добавив изгиб, который сделает их полностью или частично вертикальными без нарушения функциональности. Если это возможно, то проще вернуться назад и изменить исходный дизайн «блока», а затем повторить создание оболочки. В нашем случае изменение направления каналов невозможно, а конструкция изделия является функционально обоснованной, поэтому следующим шагом будет изучение конструкции коллектора с точки зрения оптимизации процесса аддитивного производства.

Важным фактором, который следует учитывать на этом этапе проектирования, можно считать ориентацию модели на платформе построения при изготовлении (печати), поскольку это повлияет на все другие конструкторские решения. При проектировании изделия для

аддитивного производства всегда следует учитывать конкретную его ориентацию на платформе построения в момент изготовления, поскольку его ориентация будет определять направление анизотропии, качество поверхности, округлость отверстий, количество «поддержек» и т. д. Первое решение, которое нам нужно принять, – в какой пространственной ориентации изготавливать (печатать) деталь, поскольку при разной ориентации материал «поддержки» также будет необходим в разных местах.

При реализации описанного выше действия с помощью программного обеспечения Materialise Magics, используемого для создания опорных конструкций («поддержек»), мы видим, что «поддержки» создаются между всеми горизонтальными трубами. В ориентации, где труба большого диаметра расположена горизонтально, мы можем видеть, что «поддержка» также была создана внутри этой трубы (рис. 5.13).

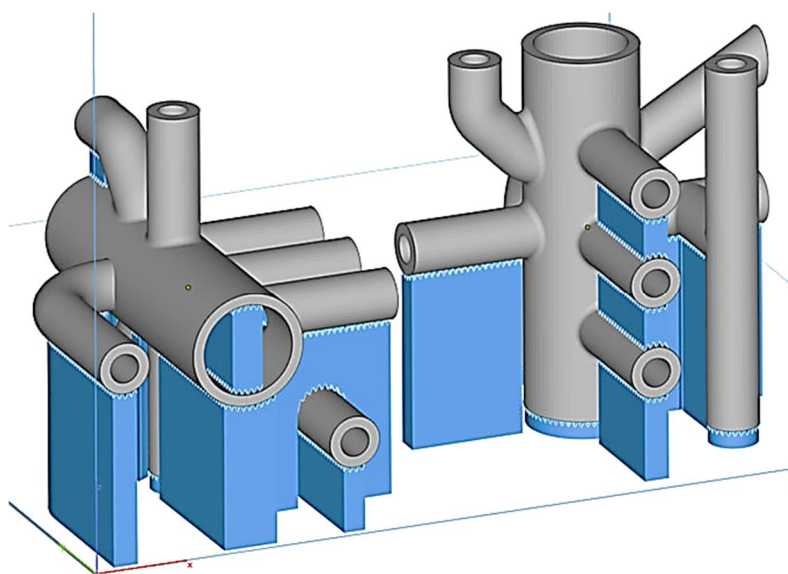


Рис. 5.13. «Поддержки», необходимые для изготовления конструкции коллектора в виде оболочки при двух его различных ориентациях на платформе построения

Обе эти ориентации модели коллектора на платформе построения позволят изготовить данное изделие и потребуют удаления «поддержек» после окончания процесса, а также некоторой обработки поверхностей для улучшения их качества в тех местах, где «поддержки» соприкасаются с основной деталью. Это повышает общую трудоемкость изготовления изделия и увеличивает его стоимость. Можно

также утверждать, что при ориентации коллектора таким образом, когда труба большого диаметра расположена горизонтально, удалить «поддержки» из этой трубы будет сложнее, чем со всех внешних поверхностей. Таким образом, если бы не было каких-либо других преимуществ у горизонтальной пространственной ориентации трубы большого диаметра, лучшей ориентацией при печати была бы та, где она находится в вертикальном положении. Если бы единственной целью этого примера по проектированию изделий для аддитивных технологий было достижение максимального снижения масса изделия, то данный пример можно было бы считать завершенным, поскольку представленная оболочковая конструкция содержит минимально необходимое количество материала. Однако одним из вариантов конструкции является такой, который предусматривает создание тонкой «стенки» между каждым из горизонтальных каналов, чтобы полностью исключить необходимость в «поддержках». Идея заключается в том, что добавленная «стенка» становится элементом детали и берет на себя функцию «поддержки».

В приведенном ниже примере нижние «стенки» скошены под углом  $45^\circ$  (превышение данного значения потребует использования «поддержек»). Для уменьшения количества затрачиваемого на изготовление «стенок» материала и массы готового изделия в «стенках» выполнена перфорация в виде овальных отверстий (рис. 5.14).

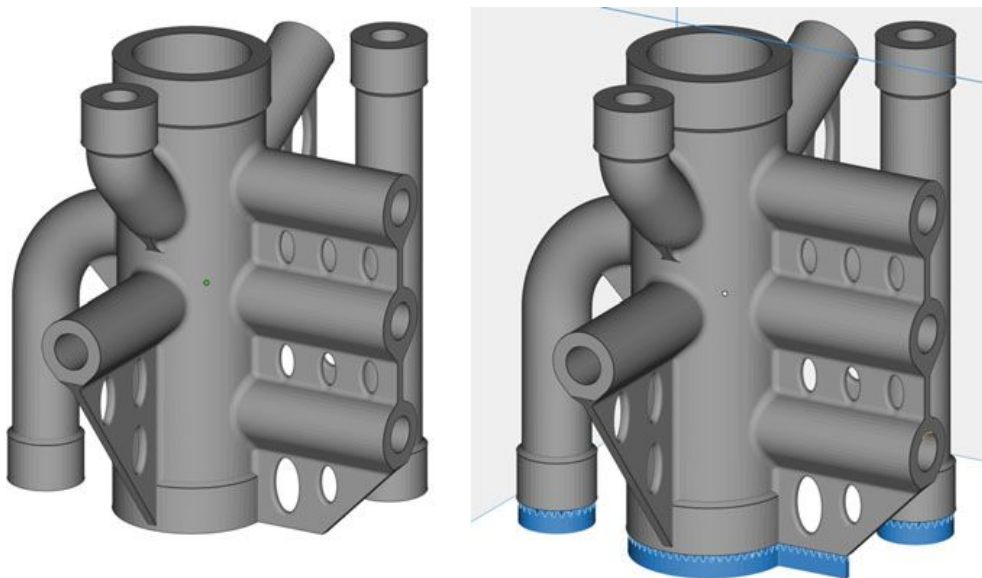


Рис. 5.14. Материал «поддержки» (светлый тон), необходимый для изготовления коллектора, с дополнительно созданными стенками между горизонтальными трубами

Использование отверстий овальной, а не круглой формы позволяет избежать использования «поддержек» внутри отверстий. Как видно, в этой новой конструкции единственным местом использования «поддержек» будет место между основной моделью и платформой построения. В некоторых случаях, если позволяют геометрические формы детали, изделие можно изготавливать прямо с платформы построения, учитывая припуск материала на удаление готового изделия с платформы построения. Добавление таких опорных «стенок» также может иметь функциональное преимущество, поскольку это делает трубу существенно более жесткой. При ввинчивании гидравлических фитингов в коллектор (отверстия в трубах) для их затяжки необходимо использовать гаечный ключ, что может привести к значительным боковым нагрузкам на трубы. Дополнительные стенки могут частично нейтрализовать эту силу и помочь свести к минимуму риск повреждения (см. рис. 5.14).

После изготовления детали остается только отделить ее от платформы построения с помощью электроэрозионной обработки проволокой или путем спиливания. Изделие будет готово к работе, но могут потребоваться операции дробеструйной или пескоструйной обработки и, возможно, нарезания резьбы на деталях коллектора для установки фитингов.

При проектировании для аддитивного производства существует ряд правил и рекомендаций, определяющих такие факторы, как минимальная толщина стенок, диаметр отверстия, превышение которого потребует использования «поддержек», угол наклона поверхностей детали к платформе построения, за пределами которого потребуются наличие «поддержек», и т. д. В рассматриваемом примере конструкции коллектора размеры всех горизонтальных труб подобраны таким образом, что их внутренний диаметр составляет от 6 до 8 мм, для которого не требуется материал «поддержки» (зависит от используемой системы БПИ). Опять же мы оптимизировали конструкцию с помощью добавления фаски под углом  $45^\circ$ , чтобы исключить необходимость в «поддержках» (рис. 5.15). Первоначальная масса оригинальной конструкции монолитного коллектора размерами  $100 \times 100 \times 100$  мм из стали составляла 7,4 кг. После проведения описанных операций масса изделия снизилась до 600 г. Это обеспечивает экономию мате-

риала более чем на 94 % и значительное сокращение времени и стоимости изготовления (печати) изделия.

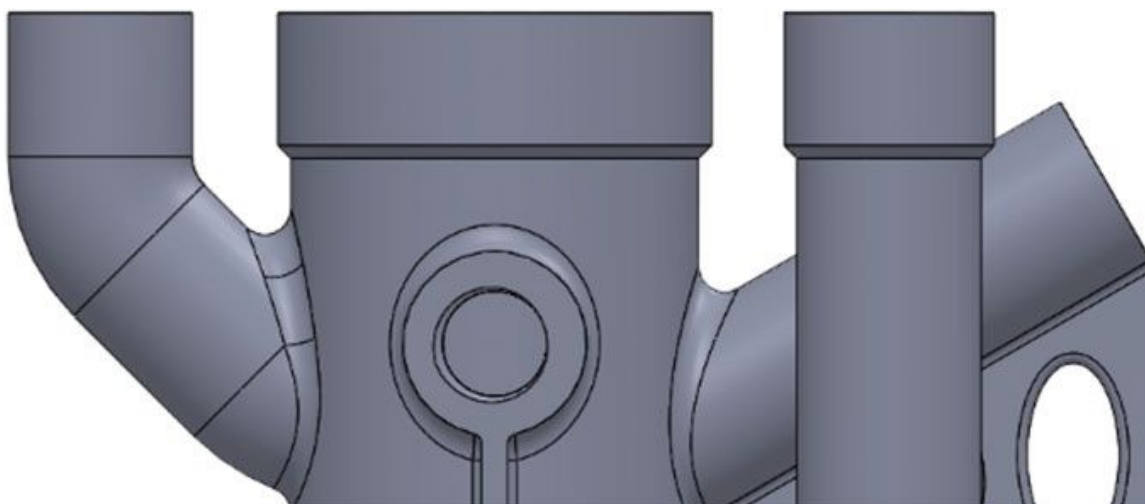


Рис. 5.15. Материал, добавляемый к трубам коллектора, которые потребуют последующей нарезки резьбы для установки фитингов с фаской 45°, для устранения необходимости генерации «поддержек»

Во многих случаях изготовления металлических изделий с применением технологий БПИ неизбежно расходование некоторого количества материала на создание «поддержек». Приведенный пример иллюстрирует, как простые конструкторские решения могут значительно сократить количество материала, требуемого для создания «поддержек», а следовательно, и последующую обработку, что приведет к созданию более качественного продукта при меньших затратах. В табл. 5.5 приведено сравнение трех вариантов конструкций коллектора с габаритными размерами 100×100×100 мм, имеющих одни и те же функциональные возможности, но различную степень проработанности для изготовления с использованием технологий быстрого прототипирования и изготовления.

Анализ табличных данных показывает, что стоимость работы станка является одним из основных слагаемых стоимости изготовления изделий с применением технологий БПИ, а параметры, которые могут влиять на стоимость работы станка, – это масса изделия и время «штриховки» (сканирования).

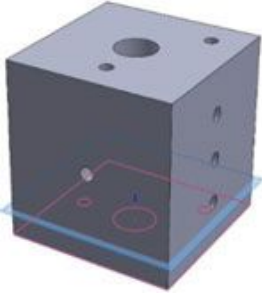
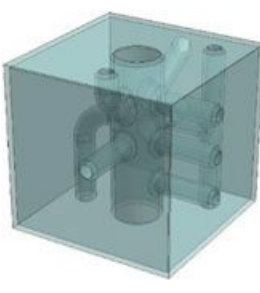

Это наглядно продемонстрировано на примере применения простой замены больших объемов материала оболочками с равномерной толщиной стенок, что оказывает существенное влияние на время



«штриховки» (сканирования), а следовательно, и на затрачиваемое машинное время и итоговую стоимость изделия.

Таблица 5.5

Сравнение трех вариантов конструкций коллектора с габаритными размерами 100×100×100 мм

| Характеристика процесса АП                                     |  |  |  |
|--|---|--|---|
|  | Монолитный коллектор  | Оболочечный коллектор  | Оптимизированный коллектор для производства на основе технологий БПИ                |
| Время «штриховки» (сканирования)                               | 687693 с  | 131481 с   | 70839 с   |
| Стоимость работы станка (при 65 дол./ч)                        | 12415 дол.  | 2379 дол.  | 1261 дол.   |
| Масса детали   | 7,411 кг  | 1,232 кг   | 0,558 кг  |
| Стоимость расходного материала (при 70 дол./кг + 10 % отходов) | 570,64 дол.   | 94,86 дол.   | 42,96 дол.  |
| Полная стоимость деталей из нержавеющей стали 316L             | 15293,82 дол.   | 3735,12 дол.   | 1986,25 дол.  |

Однако трансформация монолитных изделий в оболочковые формы не считается лучшей стратегией для использования при необходимости уменьшить массу изделия, а только наглядно демонстрирует эффект уменьшения стоимости изготовления при уменьшении требуемого объема материала. Использование монолитного коллектора в качестве примера показало возможность дальнейшего уменьшения стоимости конечного изделия за счет последующего использования дополнительных методов проектирования изделий для изготовления технологиями БПИ, которые позволяют уменьшать массу изделий

и время «штриховки» (сканирования), а также применять технику использования реальных стенок вместо материала «поддержки», чтобы свести к минимуму время последующей обработки.

Другой не менее эффективный метод заключается в изменении угла наклона элементов таким образом, чтобы они всегда находились под более острым углом к вертикальной плоскости, чем тот, который требует использования «поддержек». Этот пример демонстрирует важность процесса проектирования изделий при их подготовке к аддитивному производству с экономической точки зрения. Разница в стоимости изделий, разработанных специально для технологий БПИ, по сравнению с изделиями, спроектированными без учета особенностей процессов БПИ, но изготавливаемыми с использованием технологий аддитивного производства, значительна и показывает, что этап конструкторской проработки изделия для аддитивных технологий является абсолютно необходимой частью процесса проектирования и изготовления деталей на основе технологий БПИ. Добавьте к этому менее поддающиеся количественной оценке элементы добавленной стоимости, такие как улучшенная функциональность, сокращение времени выхода на рынок, сокращение отходов, и аргументы в пользу абсолютной необходимости конструирования специально для аддитивных технологий будут лежать на поверхности.

Далее приведем реальный пример гидравлического коллектора, используемого на подземной буровой установке фирмы «Atlas Copco» (Швеция), где применялись вышеуказанные методы для снижения массы коллекторов более чем на 90 % и значительного увеличения их функциональности. Переработанный коллектор фирмы «Atlas Copco» требовал минимального количества «поддержек», а используемые «поддержки» находились в легкодоступных местах, что делало их относительно простыми для удаления. После перепроектирования для «металлических» аддитивных технологий масса коллектора снизилась с 14,6 до 1,3 кг, т. е. более чем на 90 %. Помимо снижения массы была также улучшена функциональность коллектора. В оригинальной конструкции расположение впускных и выпускных отверстий определялось направлением, в котором можно было просверлить эти отверстия, а не тем, где они были бы наиболее подходящими с функциональной точки зрения. В переработанной версии выпускные отверстия были перенесены на верхнюю поверхность, и только впускное



отверстие осталось на нижней поверхности коллектора. Это значительно уменьшило общий объем материала, необходимого для изготовления коллектора на машине аддитивного производства (рис. 5.16 – 5.18).

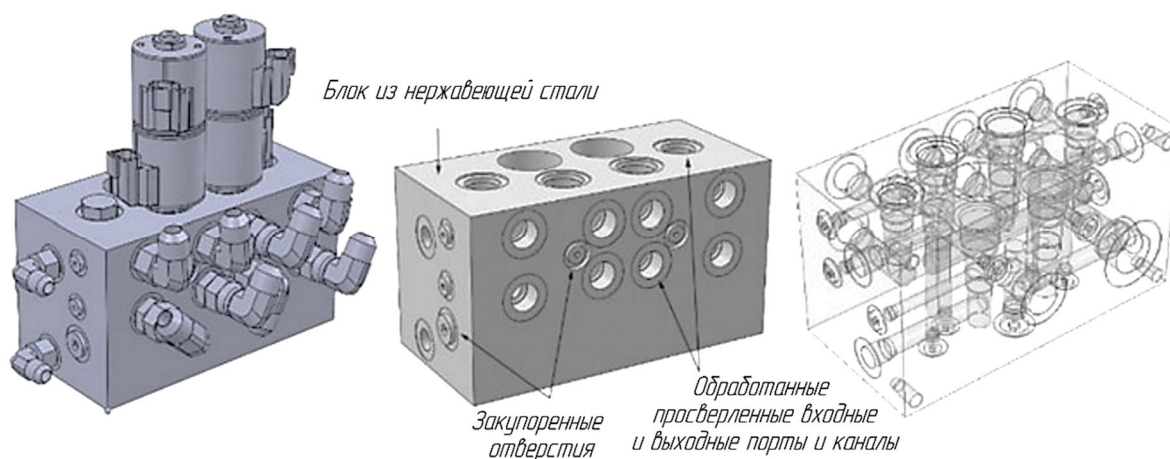
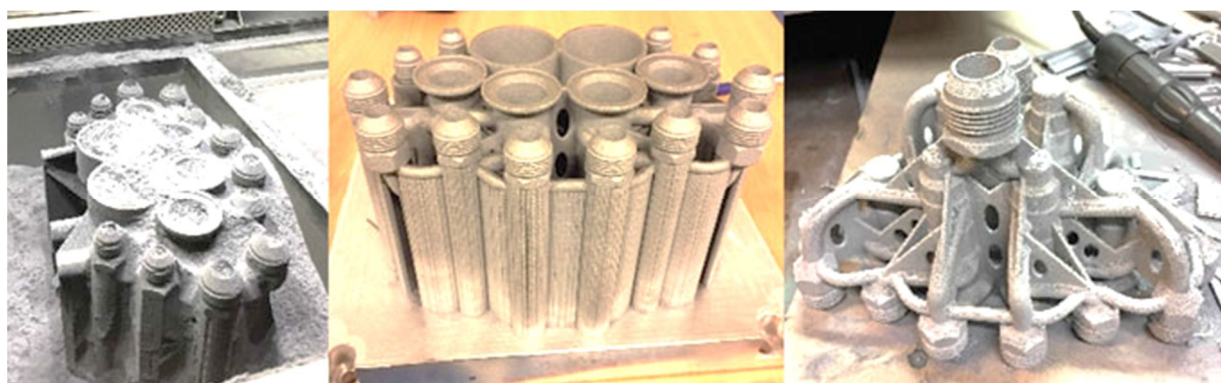


Рис. 5.16. Оригинальная конструкция коллекторного блока фирмы «Atlas Copco» (Швеция)



5.17. Гидравлический коллектор, перепроектированный специально для изготовления с использованием технологий БПИ: с небольшим количеством неубранного порошка (слева), прикрепленными «поддержками» (в центре) и удаленными «поддержками» (справа)

Практически любое изделие может быть перепроектировано для изготовления на основе технологий БПИ. Рассмотрим еще один пример, используя в качестве изделия такой нетривиальный объект, как настольную винокурню, и проиллюстрируем применение правил конструирования при проектировании изделий для их изготовления на основе аддитивных технологий (рис. 5.19).

Задача проектирования вышеупомянутого изделия была поставлена таким образом, чтобы попытаться спроектировать его так, чтобы в нем вообще не использовались «поддержки», кроме тех, которые были необходимы для его соединения с платформой построения. Размеры изделия составляют 117×58 мм (диаметры емкостей) × 66 мм (высота изделия).

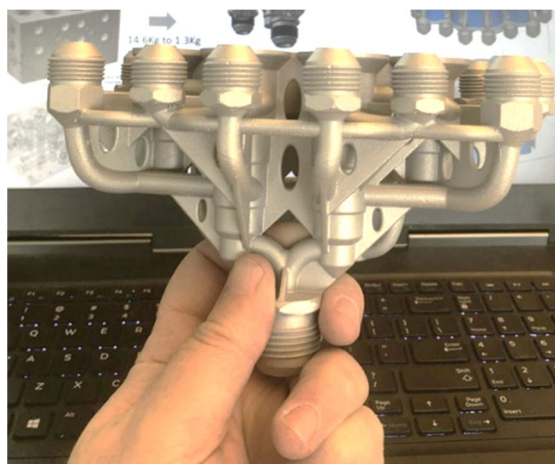


Рис. 5.18. Готовый гидравлический коллектор



Рис. 5.19. Алюминиевая настольная винокурня, изготовленная с использованием аддитивных технологий

Проектирование началось с использования той же техники создания «стенки» вместо материала «поддержки», описанной в приведенном выше примере конструирования коллектора, для поддержки спиральной трубы внутри одного из резервуаров. Если бы этого не было сделано, потребовался бы поддерживающий материал между спиральными витками, который затем было бы трудно удалить (рис. 5.20). Как правило, следует избегать любых выступов с площадью поверхности более нескольких квадратных миллиметров, а также элементов с углами, отклоняющимися более чем на 45° от вертикали, поскольку в этом случае для них потребуется «поддержка». Этот угол может варьироваться в зависимости от используемого материала и применяемой технологии БПИ. При использовании алюминия в данном примере при проектировании было сделано так, чтобы угол наклона не превышал 45° (рис. 5.21). При такой конструкции изделия это привело к тому, что после изготовления его отрезали от платформы построения, подвергли дробеструйной обработке и он был готов к использованию.



Рис. 5.20. Использование стен, чтобы избежать необходимости в «поддержках»

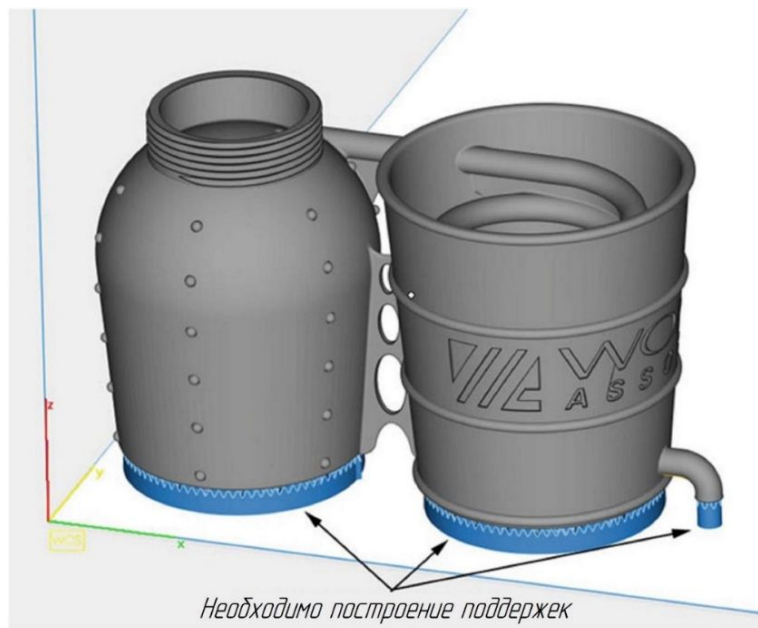


Рис. 5.21. «Поддержки», необходимые для изготовления изделия

Важно, чтобы проектирование для аддитивного производства осуществлялось сознательно, чтобы принимались обоснованные решения о том, какие стратегии использовать, чтобы минимизировать стоимость изделия и объем последующей обработки, который может потребоваться.

Нет ничего плохого в том, чтобы использовать «поддержки», что часто неизбежно. Но это должно быть сделано с учетом того, что инженер-конструктор принимает сознательное проектное решение относительно того, где это должно быть, и существуют ли стратегии проектирования, которые можно использовать, чтобы избежать этого без ущерба для функциональности изделия.

### **5.7. Выбор конструкционного материала**

Конструкторы имеют тенденцию сосредотачиваться на материале, из которого традиционно изготавливалась аналогичная деталь, и часто используют эту аналогию (выбирают тот же материал) при выборе конструкционного материала для изготовления изделия технологиями БПИ. Из-за технологических особенностей технологий БПИ, которые позволяют создавать конструкции изделий зачастую с более высокими характеристиками, в первую очередь необходимо подумать о функциях, которые должна выполнять деталь, и спроектировать ее с учетом этого.

После завершения процесса проектирования необходимо проанализировать доступные для производства технологиями БПИ материалы, чтобы определить, подходит ли один из них для выполнения данной функции и обладает ли теми физико-механическими свойствами, которые должны быть достигнуты. Поскольку изделие, которое было разработано для изготовления в аддитивном производстве, часто требует существенно меньшего количества материала, чем изделие с традиционной конструкцией, то появляется возможность изготовить его из материала с более высокими техническими характеристиками и более дорогого, не затрачивая на это больше средств, чем если бы обычная конструкция была изготовлена из материала с более низкими техническими и физико-механическими характеристиками.



## 5.8. Оптимизация топологии и решетчатые структуры

Уникальные технологические возможности аддитивного производства позволяют изготавливать изделия практически любой геометрической сложности, что означает возможность производства изделий с оптимизированной топологией (примером критерия оптимизации может служить необходимое на изготовление количество материала при сохранении требуемых прочностных характеристик изделия).



Рис. 5.22. Пример снижения массы изделия «ключ-откупорка для бутылок» за счет ОТ для изготовления технологиями БПИ

При традиционных технологиях производства (субтрактивных и формативных) конструкции, основанные на оптимизации топологии, хотя и являются оптимальными с точки зрения критериев проектирования, но могут быть дорогостоящими или неосуществимыми в изготовлении. Однако в настоящее время технологии аддитивного производства позволяют изготавливать такие сложные оптимизированные формы (рис. 5.22).

Рассмотрим применение метода ОТ для уменьшения затрат материала на примере такого изделия, как «ключ-откупорка для бутылок» при изготовлении указанной детали из цельной алюминиевой заготовки массой чуть более 10 г. Данное изделие при изготовлении

Оптимизация топологии (ОТ) – это численная методика, которая оптимизирует компоновку материала в заданном проектом пространстве для заданных граничных условий таким образом, чтобы результирующая компоновка соответствовала определенному набору целевых показателей производительности. ОТ отличается от оптимизации формы и размеров тем, что дизайн изделия может иметь любые формы в пространстве, вместо того чтобы иметь дело с predetermined конфигурациями.

субтрактивными или формативными технологиями будет иметь массу порядка 4 г.

При использовании ОТ для производства изделия на основе технологий БПИ его масса составит менее 1 г. В настоящее время существует огромное количество программных пакетов для проведения процесса ОТ. К ним относятся:

➤ Специализированное программное обеспечение для оптимизации топологии:

- ✓ Altair Optistruct and solidThinking Inspire;
- ✓ Tosca;
- ✓ Top3D (MatLab);
- ✓ Paramatters;
- ✓ LiveParts.

➤ Программные продукты премиум класса:

- ✓ Abaqus;
- ✓ Nastran;
- ✓ Ansys.

Процесс проведения оптимизации технологии изделий в большинстве случаев выглядит следующим образом:

**1. Упрощение модели:** удалите из 3D-модели изделия все элементы, которые были спроектированы для традиционного производства. Для оптимизации необходим максимально большой объем материала, с которым программное обеспечение может проводить работы по оптимизации. Чем больше «пространства для проектирования» мы даем программному обеспечению для проведения ОТ, тем лучше. Чем меньший объем, чем меньшее количество материала использует программное обеспечение, тем меньше «свободы» для проведения оптимизации конструкции изделия.

**2. Задание подходящего конструкционного материала:** выберите материал, из которого будет изготовлено изделие, учитывая, что, использование ОТ резко сокращает количество используемого конструкционного материала, поэтому можно использовать более дорогой материал или с более высокими физико-механическими характеристиками, чем исходный.

**3. Деление модели на области:** разделите модель на области с фиксированной геометрией (например, с крепежными или установочными элементами) и области, подвергаемые ОТ («пространство про-

ектирования»). Выделяя указанные области, необходимо руководствоваться тем, что чем бóльшие области будут выделены на проведение процесса ОТ, тем больше «свободы» будет иметь программное обеспечение.

**4. Использование различных сценариев** задания нагрузок. Хорошей стратегией может быть использование одного вида нагрузки для каждого сценария. Каждый сценарий может быть использован для разработки оптимизированной конструкции детали для конкретных условий нагружения. Различные варианты конструкций затем могут быть объединены в одну конструкцию, которая охватывает все сценарии нагружения.

**5. Оптимизация топологии:** запустите процесс ОТ топологии в выбранном программном обеспечении и дождитесь результатов оптимизации.

**6. Сглаживание острых кромок модели:** сгладьте острые кромки оптимизированной геометрии, используя радиусы скругления, для подготовки модели к производству с помощью аддитивных технологий.

Одним из наиболее важных аспектов оптимизации технологии является то, что нагрузки, которые будут действовать на изделие, должны быть точно определены. Если модель настроена неправильно, то результаты, которые она выдает, не будут иметь смысла (рис. 5.23).

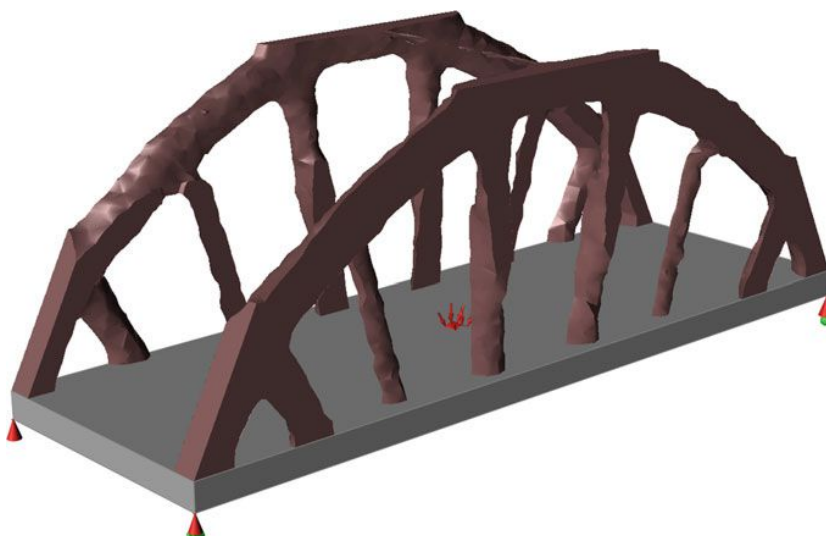


Рис. 5.23. Пример неправильного задания действующих сил и ограничений, характеризующих условия работы изделия

Обратите внимание, что ОТ – это не процесс, который автоматически создает готовые к использованию изделия. Это приводит к получению «грубых» моделей, которые затем необходимо сгладить (рис. 5.24).

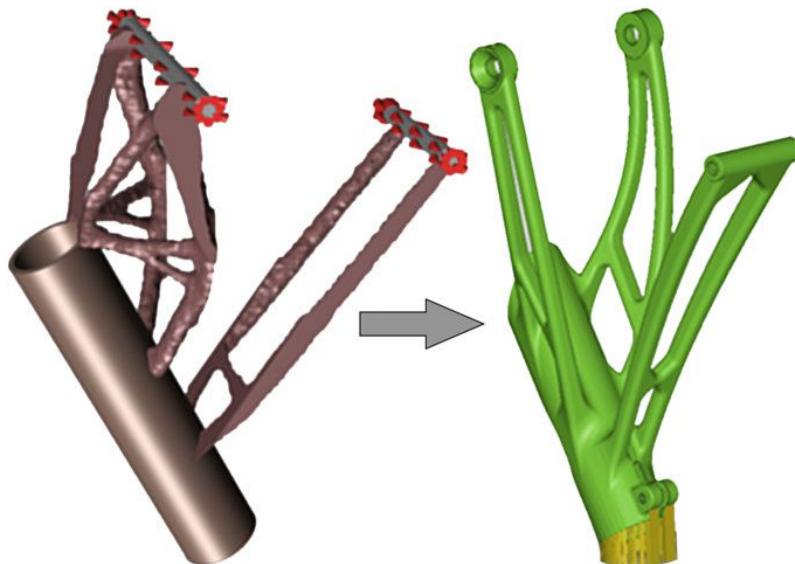


Рис. 5.24. В процессе оптимизации топологии создается «грубая» модель, которую затем необходимо сгладить, используя радиусы скругления

Существуют различные способы получения таких сглаженных моделей:

- ✓ использование встроенных функций «Polynurbs», которые начинают предлагать некоторые программные продукты для ОТ;
- ✓ применение специализированного программного обеспечения для сглаживания, такого как Materialise 3 Matic или Geomagic;
- ✓ использование идей проектирования для оптимизации «грубой» топологии в качестве шаблонов для повторного проектирования в пакетах САПР. По некоторым оценкам, этот метод наиболее предпочтителен, так как позволяет получить параметрическую 3D-модель, которую можно использовать в пакете САПР.

## 5.9. Консолидация деталей в сборке

Перед началом процесса конструирования всегда необходимо ответить на следующий вопрос: какова самая простая конфигурация изделия, которую возможно изготовить технологиями БПИ, не нанося ущерб функциональным характеристикам изделия в ориентации,



обеспечивающей отсутствие анизотропии. Одним из ответов на этот вопрос может стать объединение нескольких элементов (консолидация) изделия в один или нескольких деталей сборки в одно изделие. Консолидация деталей заключается в преобразовании изделия, состоящего из множества простых деталей, в изделие, состоящее из меньшего количества, но более сложных деталей. Приведенные ниже рекомендации представляют собой общий подход, который может помочь инженерам-проектировщикам решить, необходимо ли применять консолидацию, при проектировании конкретного изделия. Например, эффект от применения процесса консолидации можно проиллюстрировать следующим примером. Продукт состоит из 10 деталей. Используя консолидацию, можно добиться сокращения количества деталей на 10 %, после консолидации продукт будет содержать 9 деталей. При таком количестве деталей это не так уж и много, но если продукт будет состоять из десяти тысяч или миллиона деталей, то сокращение составит 1000 или 100 000 деталей, и сокращение деталей на 10 % будет очень существенным. А при увеличении процента сокращаемых деталей эффект будет еще более значительным. Использование процесса консолидации деталей оказывает следующее положительное влияние на процесс проектирования:

- ✓ сокращение времени разработки сборочных и монтажных чертежей;
- ✓ сокращение времени планирования закупки комплектующих, сырья и материалов;
- ✓ уменьшение количества закупаемых стандартных изделий;
- ✓ уменьшение количества деталей, подвергаемых контролю качества;
- ✓ снижение расходов на складское хозяйство;
- ✓ сокращение времени на комплектацию изделий;
- ✓ снижение производственных затрат времени на сборочные операции;
- ✓ сокращение этапов и времени проверки и сертификации готового изделия.

Вышеуказанные улучшения могут компенсировать потенциальное увеличение стоимости компонентов на основе аддитивных технологий. Очень важный аспект, который следует помнить при осуществлении процесса консолидации отдельных деталей, заключается в том, что не существует одного абсолютно правильного универсального решения. Всегда необходимо искать индивидуальное решение,

проверять несколько вариантов из множества различных возможностей, которые позволят изготовить конкретный продукт из меньшего количества деталей. Именно комплексный учет факторов, в которых изделие будет изготовлено, собрано и использовано, определяет, является ли один вариант лучше или хуже другого.

### **Конструирование для повышения функциональности изделий**

Для оценки возможности проведения процесса консолидации двух и более деталей в одну в первую очередь необходимо выбрать те детали, которые непосредственно отвечают за функциональные свойства продукта. Сосредоточьтесь на задаче, которую продукт будет выполнять в конкретных условиях, в которых он будет использоваться. Оптимизацию конструкции по числу деталей необходимо проводить в соответствии с его функцией, а не с технологическими процессами, используемыми для его создания. Пример такой оптимизации показан на рис. 5.25.

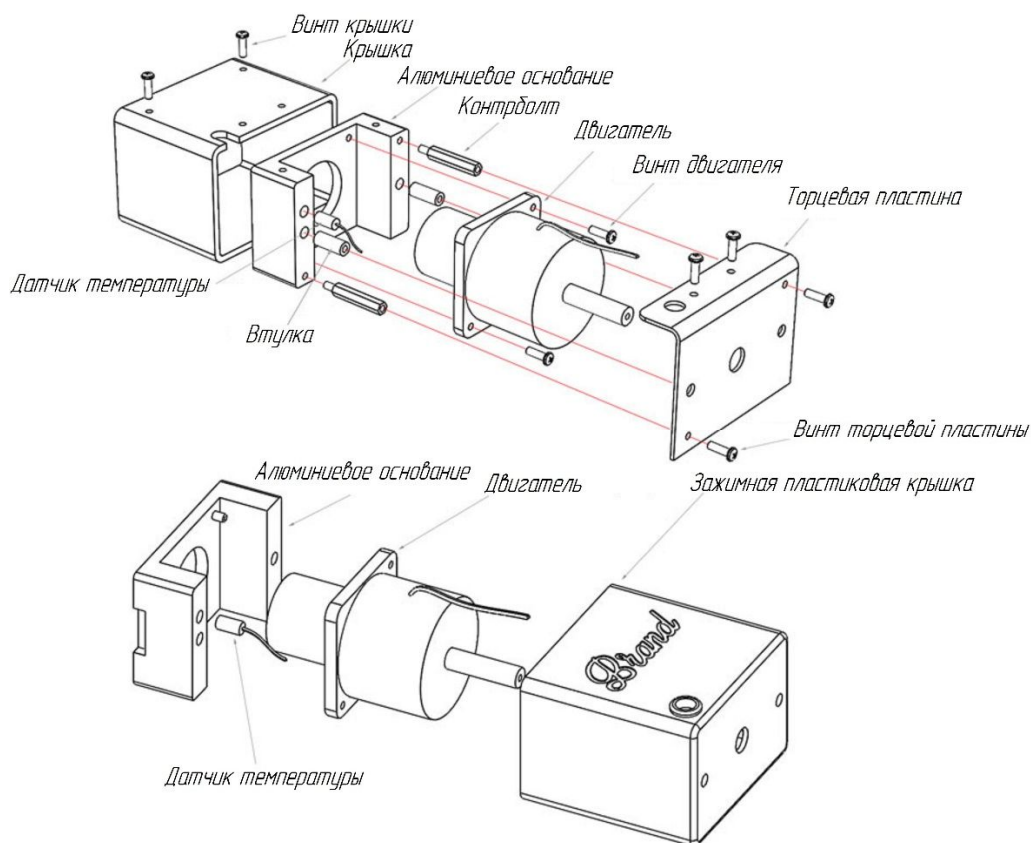


Рис. 5.25. Конструкция изделия содержит 19 компонентов и несколько этапов сборки. Конструкция изделия, полученная в результате консолидации отдельных деталей, сокращает их количество до четырех и обеспечивает гораздо более легкую сборку с меньшим количеством этапов

Необходимо учитывать следующие рекомендации:

- ✓ устранить или уменьшить жесткие допуски на сопрягаемые детали. Соблюдение жестких требований по допускам является дорогостоящим, но этого можно избежать: если две сопрягаемые детали объединены (консолидированы) в одну, то все затраты, связанные с контролем допусков в местах сопряжения деталей, исчезают;

- ✓ четко определить функциональное назначение каждого компонента сборки, а также оценить возможность консолидации второстепенных деталей и стандартных изделий;

- ✓ оценить возможность консолидации двух и более деталей, которые изготовлены из одного и того же материала и не перемещаются относительно друг друга;

- ✓ оценить возможность консолидации двух и более деталей, которые изготовлены из разных материалов и не перемещаются относительно друг друга.

При оценке возможности консолидации деталей из разного материала необходимо учитывать:

- ✓ количество крепежных элементов;

- ✓ сделаны ли детали из разных материалов по аналогии с традиционными (в этом случае стоит подумать о том, чтобы использовать один и тот же материал);

- ✓ если детали отличаются из-за требований к механическим свойствам, то может ли деталь, изготовленная из более прочного (более дорогого) материала, быть изготовлена из менее прочного (более дешевого) материала и усилена с помощью ребер жесткости или решетчатых структур;

- ✓ если детали отличаются термическими или химическими свойствами, то может ли деталь, изготовленная из менее стойкого материала, быть изготовлена из более стойкого материала;

- ✓ если необходимо использовать более дорогой материал, оправдает ли меньшее количество деталей увеличение материальных затрат.

Если более одной трети деталей являются крепежными элементами, то следует поставить под сомнение количество деталей и последовательность процесса сборки. Рассматриваемый пример демонстрирует, что рекомендации по консолидации деталей не являются абсолютными, которые всегда гарантируют лучший результат. В не-

которых случаях, исходя из условий монтажа, изделие, состоящее из нескольких деталей (слева), может быть лучшим решением, чем сборка, показанная справа (рис. 5.26). Кроме того, поскольку объем детали играет важную роль в определении ее стоимости, более экономично производить много небольших изделий (компонентов сборки) и собирать их вместе, несмотря на дополнительные затраты на рабочую силу и крепежные детали (см. рис. 5.26).

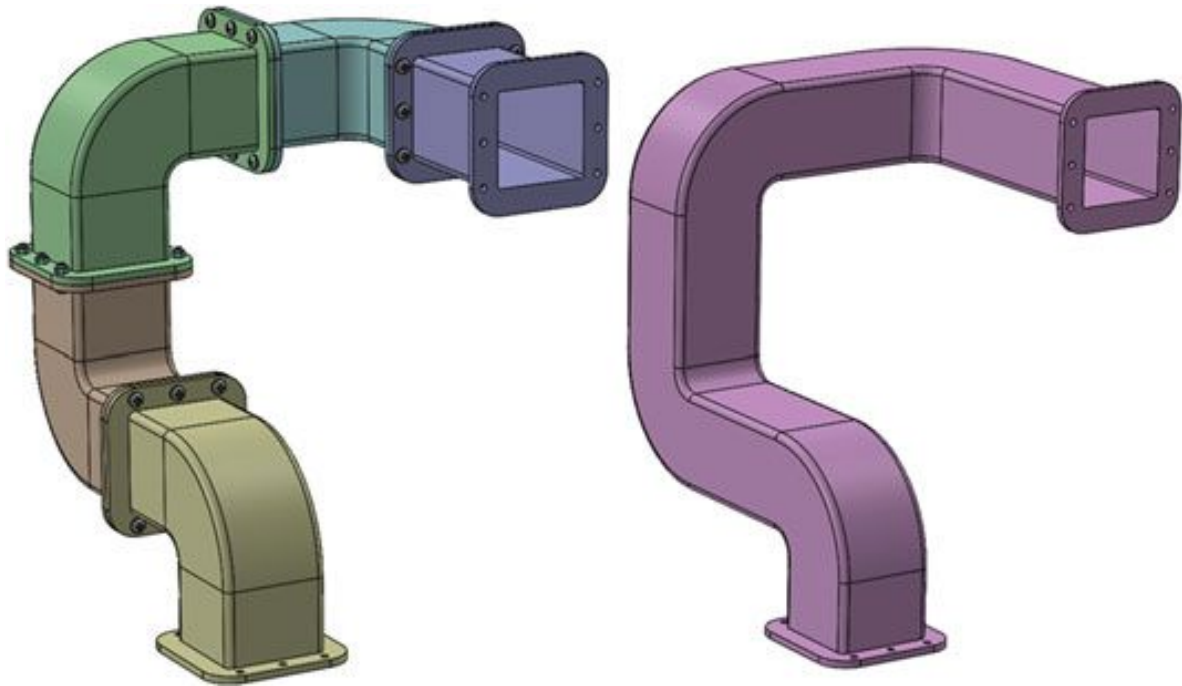


Рис. 5.26. Сборка слева содержит 48 крепежных элементов (и потенциально вдвое больше, если мы используем плоские и стопорные шайбы) для пяти компонентов. Конструкция справа исключает все эти крепежные элементы и позволяет избежать риска протечек между уплотнениями

*Проектирование подвижных элементов в сборке.* Аддитивные технологии позволяют изготавливать узлы с подвижными элементами, но следует рассмотреть вопрос о том, практично ли это с инженерной точки зрения. Процессы БПИ имеют относительно низкий уровень точности и требуют больших зазоров между движущимися частями. Поэтому, например, невозможно изготовить полнофункциональный шарикоподшипник (кроме как в качестве декоративного предмета), но можно изготовить рабочую стяжку для проводов, которая требует относительно низкого уровня точности (рис. 5.27). Зазор

между движущимися частями зависит от площади поверхностей, которые будут находиться в контакте. Небольшая площадь поверхности требует меньшего зазора между движущимися частями.

При аддитивном производстве часто возникает желание изготавливать изделия с движущимися частями лишь для того, чтобы напечатать подобное изделие, а не потому, что движущиеся части добавляют какую-то функциональность или ценность, это нецелесообразно.

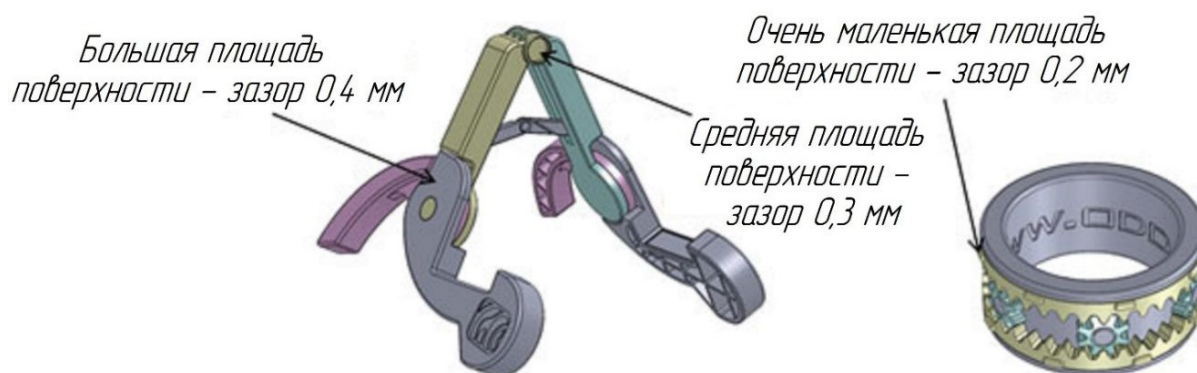


Рис. 5.27. Требуемые зазоры между движущимися частями зависят от площади поверхности

Представленные в данной главе расчеты приведены в долларах США, однако данная денежная единица может быть заменена на любую другую, в которой необходимо произвести расчеты. Приведенные цифры (стоимость оборудования, норма-часа и др.) даны ориентировочно для ознакомления с методикой расчета и оценкой вклада каждого стоимостного компонента в цену готового изделия.

В заключение хотелось бы отметить, что, выполняя процесс консолидации деталей, важно руководствоваться имеющимся опытом и здравым смыслом. Консолидация целесообразна только тогда, когда она действительно необходима и будет способствовать получению явного положительного эффекта. Таким образом, консолидация деталей – это мыслительный процесс, а не абсолютный набор правил проектирования [25].

## Контрольные вопросы

1. Перечислите основные правила по проектированию изделий для их изготовления на основе технологий БПИ.
2. На основании оценки каких показателей строится оценка целесообразности применения технологий БПИ?
3. Как учитывается ориентация изделия на платформе построения при его конструировании?
4. Приведите примеры конструкций изделий, позволяющих минимизировать количество конструкционного материала и материала «поддержек».
5. Каково влияние конструктивных особенностей изделия на этапы процесса аддитивного производства?
6. Необходимо ли учитывать анизотропию свойств готового изделия в процессе его конструирования?
7. Какие преимущества дают оптимизация топологии и решетчатые структуры при их использовании в конструкции проектируемого изделия?
8. Для чего используется консолидация деталей в сборке?
9. Опишите подход к консолидации подвижных деталей сборки.
10. Какими принципами необходимо руководствоваться при проведении консолидации деталей сборки?
11. Как учитывается экономический аспект при конструировании деталей для аддитивного производства?
12. Назовите универсальные правила конструирования изделий для их производства на основе технологий БПИ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В наши дни аддитивные технологии используются повсеместно: научно-исследовательские организации с их помощью создают уникальные материалы и ткани; промышленные гиганты используют 3D-принтеры для ускорения прототипирования новой продукции; архитектурные и конструкторские бюро нашли в 3D-печати нескончаемый строительный потенциал, в то время как дизайн-студии буквально вдохнули новую жизнь в дизайнерский бизнес благодаря аддитивным машинам.

Однако использование преимуществ аддитивных технологий во всех указанных сферах невозможно без наличия грамотных, подготовленных специалистов в данной области, которые имеют необходимые знания о ключевых технологиях быстрого прототипирования, структуре технологического процесса, особенностях проектирования и производства изделий, полученных аддитивными технологиями.

Изучение теоретического материала, приведенного в учебном пособии, позволит читателю получить начальные знания в области аддитивных технологий и заложить теоретический фундамент для дальнейшего углубленного изучения особенностей и областей применения технологий быстрого прототипирования, а также станет хорошей основой для развития практических компетенций в области создания изделий методами аддитивного производства.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. David, L. Bourella, Joseph J. Beaman, Jr.a, Ming C. Leub and David W. Rosenc. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead. RapidTech 2009. – Режим доступа: [www.rapidtech.itu.edu.tr](http://www.rapidtech.itu.edu.tr) (дата обращения: 09.10.2022).
2. Beaman, J. J. Solid Freeform Fabrication: An Historical Perspective. The University of Texas. Austin, Texas.
3. Carl, R. Deckard. Patent US 4863538 A. Method and apparatus for producing parts by selective sintering.
4. Lou, A. Selective laser sintering, birth of an industry / A. Lou, C. Grosvenor. The University of Texas at Austin (6 дек. 2012). – Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20200129172902/http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry#ch4> (дата обращения: 05.09.2016).
5. Sclater, Neil; Nicholas P. Chironis (2001). Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook. McGraw-Hill Professional. – P. 472. – ISBN 978-0-07-136169-9.
6. Тарасова, Т. В. Аддитивное производство : учеб. пособие / Т. В. Тарасова. – М. : ИНФРА-М, 2020. – 196 с. – (Высшее образование). – DOI 10.12737/textbook\_5c25c2b3a03f99.16774025.
7. Additive Fabrication Terminology Unraveled. – Режим доступа: [www.additive3d.com/nm\\_01.htm](http://www.additive3d.com/nm_01.htm) (дата обращения: 09.10.2022).
8. Кузнецов, В. Системы быстрого изготовления прототипов и их расширения / В. Кузнецов // CAD/CAM/CAE Observer. – 2003. – Т. 1. – № 4 (13). – С. 2 – 7.
9. Отто, А. Объединение лазерной обработки материалов с процессом формообразования / А. Отто // Фотоника. – 2007. – № 5. – С. 2 – 6.
10. Петрушин, С. И. Технология послойного синтеза изделий-прототипов : учеб. пособие / С. И. Петрушин, А. А. Сапрыкин, Н. А. Сапрыкина. – Томск : Изд-во Томс. политехн. ун-та, 2009. – 101 с.
11. Шишковский, И. В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий / И. В. Шишковский. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 424 с. – ISBN 978-5-9221-1122-5.



12. Negis, E. Classification of Major Additive Automated Fabrication Technologies / E. Negis. – Режим доступа: [www.turkcadcam.net/erkutnegis/projeler/automated-fabrication-tech-classification-1995.pdf](http://www.turkcadcam.net/erkutnegis/projeler/automated-fabrication-tech-classification-1995.pdf) (дата обращения: 09.10.2022).
13. About 3D-Systems. – Режим доступа: [www.3dsystems.com/company/index.asp](http://www.3dsystems.com/company/index.asp) (дата обращения: 09.10.2022).
14. Stereolithography. – Режим доступа: [www.photopolymer.com/stereo\\_lithography.htm](http://www.photopolymer.com/stereo_lithography.htm) (дата обращения: 09.11.2022).
15. Fortus 3D Production Systems – Dimension 3D Printers – Red-Eye on Demand Services. – Режим доступа: [www.stratasys.com/corporate2.aspx?id=5542](http://www.stratasys.com/corporate2.aspx?id=5542) (дата обращения: 15.10.2022).
16. Z Corp. Homepage. – Режим доступа: [www.zcorp.com/en/home.aspx](http://www.zcorp.com/en/home.aspx) (дата обращения: 12.10.2022).
17. SME-Direct Digital Manufacturing Tech Group. – Режим доступа: [www.sme.org](http://www.sme.org) (дата обращения: 09.11.2022).
18. Gibson, I. Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker. – New York, USA : Springer, 2009. – 459 p.
19. Зубинский, А. CAD/CAM/CAE: за границами цифрового производства / А. Зубинский // Компьютерное обозрение. – 2008. – № 20 (637). – С. 26 – 33.
20. Никарус-Оборудование. – Режим доступа: [www.nikarus.com/index.php?option=com\\_content&task=section&id=5&Itemid=202](http://www.nikarus.com/index.php?option=com_content&task=section&id=5&Itemid=202) (дата обращения: 12.10.2022).
21. STRATASYS. Быстрое прототипирование. – Режим доступа: [www.solver.ru/products/cadprod/stratasys.asp](http://www.solver.ru/products/cadprod/stratasys.asp) (дата обращения: 09.11.2022).
22. ASTM Additive Manufacturing Committee Approves Terminology Standard. – Режим доступа: [www.astmnewsroom.org/default.aspx?pageid=1944](http://www.astmnewsroom.org/default.aspx?pageid=1944) (дата обращения: 09.11.2022).
23. Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age / Ed. by N. Hopkinson, R. J. M. Hague, P. M. Dickens. – Chichester, England: John Wiley, 2006. – 304 p.
24. JTEC/WTEC Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan / F. B. Prinz [et al.] – Vol. I. Analytical Chapters. – Режим доступа: [www.wtec.org/loyola/rp/toc.htm](http://www.wtec.org/loyola/rp/toc.htm) (дата обращения: 12.11.2022).

25. A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing. Springer Series in Advanced Manufacturing / O. Diegel [et al.]. – 2019. – 236 p.

26. EnvisionTEC: Home. – Режим доступа: [www.envisiontec.de](http://www.envisiontec.de). (дата обращения: 12.11.2022).

27. Dolenc, A. An Overview of Rapid Prototyping Technologies in Manufacturing / A. Dolenc. – Режим доступа: [citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.106.9496&rep=rep1&type=pdf](http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.106.9496&rep=rep1&type=pdf) (дата обращения: 12.11.2022).

28. Liou, F. Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox for Prototype Development / F. Liou – Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2008. – 568 p.

29. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб. : Питер, 2004. – 560 с. – ISBN 5-94723-770-9.

30. Пат. 4752498 США. МКИ В05D 3/06. Method and Apparatus for Production of Three-dimensional Objects by Photosolidification / Fudim E. V. Заяв. 02.03.1987. Опубл. 21.06.1988. – 10 с.

31. PolyJet Matrix Multi-Material 3D Printing Technology by Objet Geometries. – Режим доступа: [www.objet.com/PRODUCTS/PolyJet\\_Matrix\\_Technology](http://www.objet.com/PRODUCTS/PolyJet_Matrix_Technology) (дата обращения: 09.11.2022).

32. Уэйн, Р. Основы применения фотохимии / Р. Уэйн – М. : Мир, 1991. – 304 с.

33. Rapid Prototyping & Manufacturing. Fundamentals of Stereolithography / Ed. by P. F. Jacobs. – Dearborn, MI, USA : Society of Manufacturing Engineers, 1992. – 434 p.

34. Семчиков, Ю. Д. Высокомолекулярные соединения / Ю. Д. Семчиков. – М. : Академия, 2003. – 368 с. – ISBN 5-85746-482-X.

35. Venuvinod, P. K. Rapid Prototyping. Laser-based and Other Technologies / P. K. Venuvinod, W. Ma. – Norwell, MA, USA : Kluwer Academic Publishers. – 2004. – 389 p.

36. Оперативное формирование трехмерных объектов методом лазерной стереолитографии / А. В. Евсеев [и др.] // Современные лазерно-информационные и лазерные технологии : сб. тр. ИПЛИТ РАН. – М. : Интерконтакт наука, 2005. – С. 26 – 39.

37. Davis, B. E. Characterization and Calibration of Stereolithography Products and Processes / B. E. Davis. – Режим доступа: [www.srl.gatech.edu/publications/2001/davis.thesis.MS.sept.2001.pdf](http://www.srl.gatech.edu/publications/2001/davis.thesis.MS.sept.2001.pdf) (дата обращения: 12.11.2022).

38. Horton, L. An Experimental Study of the Parameters Affecting Curl in Parts Created Using Stereolithography / L. Horton, E. Gargiulo, M. Keefe // 4th Solid Freeform Fabrication Symp. – Austin ; Texas, USA, 1993. – P. 178 – 185.

39. Pham, D. T. A study of recoating in stereolithography / D. T. Pham, C. Ji // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2003. – Iss. 217 (1). – P. 105 – 117.

40. Tille, C. Process Errors and Aspects for Higher Resolution in Conventional Stereolithography / C. Tille // 15th Solid Freeform Fabrication Symposium. – Austin ; TX, USA, 2004. – P. 281 – 292.

41. Dental-Revue. – Режим доступа: [www.dental-revue.ru/index.php?page=03&subPage=01&artId=40&artNum=5](http://www.dental-revue.ru/index.php?page=03&subPage=01&artId=40&artNum=5) (дата обращения: 09.12.2022).

42. Chua, C. K. Rapid Prototyping: Principles and Applications / C. K. Chua, K. F. Leong, C. S. Lim. – Singapore : World Sc. Publ., 2003. – 447 p.

43. Петрушин, С. И. PBF-методы послойного синтеза физических моделей изделий / С. И. Петрушин, А. В Вальтер // Инновационные технологии и экономика в машиностроении : сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. с элементами науч. шк. для молодых ученых. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. – С. 198 – 202.

44. Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting / J. P. Kruth, [et al.] // Proceedings of 15th Solid Freeform Fabrication Symposium. – Austin, TX, USA, 2004. – P. 44 – 59.

45. Либенсон, Г. А. Процессы порошковой металлургии / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. В 2 т. Т. 2. Формование и спекание. – М. : МИСИС, 2002. – 320 с. – ISBN 5-87623-098-7.

46. Физические особенности селективного лазерного спекания порошковых металл-полимерных композиций / А. М. Иванова [и др.] // Квантовая электроника. – 1998. – № 5. – С. 433 – 438.

47. Thomas, H. R. High Speed Sintering – Continuing research into a new RapidManufacturing process / H. R. Thomas, N. Hopkinson, P. Erasenthiran // Rapid Prototyping Journal. – 2007. – Vol. 14 – Iss. 3. – P. 682 – 691.

48. Yoozbashizadeh, M. Development of Selective Inhibition Sintering (SIS) for Metallic Parts fabrication / M. Yoozbashizadeh, B. Khoshnevis, N. Mozaka // International Journal of Advanced Manufacturing Systems. – 2011. – Vol. 13. – Iss. 1. – P. 107 – 122.

49. Stratoconception – Procédé de Prototypage Rapide et Outillage Rapide. – Режим доступа: [www.stratoconception.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=59&Itemid=84&lang=en](http://www.stratoconception.com/index.php?option=com_content&task=view&id=59&Itemid=84&lang=en) (дата обращения: 12.12.2022).

50. Wohlers, T. Worldwide Trends in Additive Manufacturing / T. Wohlers. – Режим доступа: [iweb.tntech.edu/rrpl/rapidtech2009/wohlers.pdf](http://iweb.tntech.edu/rrpl/rapidtech2009/wohlers.pdf) (дата обращения: 12.10.2022).

51. 1zu1 Prototypen – Fused Deposition Modeling (FDM). – Режим доступа: [www.1zu1prototypen.com/urmodelle/fdm.htm](http://www.1zu1prototypen.com/urmodelle/fdm.htm) (дата обращения: 12.12.2022).

52. Stratasys, Inc. – Investors – News Release. – Режим доступа: [phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=61402&p=irol-newsArticle&ID=1633972&highlight=](http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=61402&p=irol-newsArticle&ID=1633972&highlight=) (дата обращения: 12.11.2022).

53. RepRap – RepRapWiki. – Режим доступа: [reprap.org/wiki/Main\\_Page](http://reprap.org/wiki/Main_Page) (дата обращения: 12.11.2022).

54. Кравченко, Е. Г. Аддитивные технологии в машиностроении [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Е. Г. Кравченко, А. С. Верещагина, В. Ю. Верещагин // IPR SMART. – М. : Ай Пи Ар Медиа, 2021. – 139 с. – ISBN 978-5-4497-1012-3. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/105704.html> (дата обращения: 12.11.2022).

55. Home of The POM Group Inc. – CLOSED LOOP TECHNOLOGY. – Режим доступа: [www.pomgroup.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=61&Itemid=122](http://www.pomgroup.com/index.php?option=com_content&task=view&id=61&Itemid=122) (дата обращения: 12.11.2022).

56. Marsan, A. L. An Assessment of Data Requirements and Data Transfer Formats for Layered Manufacturing. / A. L. Marsan, V. Kumar, Dutta D. – Gaithersburg, MD, USA : NIST, 1998. – 61 p.

57. Burns, M. Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing / M. Burns. – Englewood Cliffs, N. J., USA : PTR Prentice Hall, 1993. – 369 p.

58. Tyberg, J. Local adaptive slicing for layered manufacturing / J. Tyberg, J. H. Bohn. – Режим доступа: [www-rp.me.vt.edu/bohn/projects/tyberg/thesis.pdf/](http://www-rp.me.vt.edu/bohn/projects/tyberg/thesis.pdf/) (дата обращения: 12.11.2022).

59. Dolenc, A. Slicing Procedures for Layered Manufacturing Techniques / A. Dolenc, I. Makela // Computer-Aided Design. – 1994. – Vol. 26. – Iss. 2. – P. 119 – 126.

60. Suh, Y. S. Adaptive Slicing of Solid Freeform Fabrication Processes / Y. S. Suh, M. J. Wozny // Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium. – Austin, TX, USA : University of Texas at Austin, 1994. – P. 404 – 411.

61. Kulkarni, P. Adaptive Slicing for Parametrizable Surfaces for Layered Manufacturing / P. Kulkarni, D. Dutta // Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference. – Boston, MA, USA, 1995. – P. 211 – 217.

62. Сапрыкин, А. А. Повышение производительности процесса селективного лазерного спекания при изготовлении прототипов : дис. ... канд. техн. наук / Сапрыкин А. А. – Томск, 2006. – 161 с.

63. Пат. 2393056 РФ. МКИ В22F 3/105. Способ спекания деталей из порошка / Сироткин О. С., Рыцев С. Б., Тимофеев А. И., Филиппов Е. И. Заявл. 18.12.2008. Опубл. 27.06.2010. Бюл. № 18. – 7 с.

64. Сапрыкин, А. А. Режимы формирования поверхности прототипа, изготовленного методом послойного селективного лазерного спекания / А. А. Сапрыкин, Н. А Сапрыкина // Инновации в машиностроении : материалы I Междунар. науч.-практ. конф. 7 – 9 окт. 2010. – Бийск, 2010. – С. 58 – 60.

65. Horvath, I. Automated Evaluation of Advanced Layered Manufacturing Processes by Process Planning / I. Horvath. – Режим доступа: [du-toce.io.tudelft.nl/~jouke/docdb/docs/rpm2000smit.pdf](http://du-toce.io.tudelft.nl/~jouke/docdb/docs/rpm2000smit.pdf) (дата обращения: 09.10.2022).

66. Qian, X. Automated Evaluation of Advanced Layered Manufacturing Processes by Process Planning / X. Qian, D. Dutta. – Режим доступа: [mmae.iit.edu/cadcam/pub/fbd-cad.pdf](http://mmae.iit.edu/cadcam/pub/fbd-cad.pdf) (дата обращения: 09.10.2022).

## ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АП – аддитивное производство

АТ – аддитивная технология

БПИ – быстрое прототипирование и изготовление

ВСС – высокоскоростное спекание

ЖФС – жидкофазное спекание

ЛЛ – листовое ламинирование

ЛСОИ – лазерный синтез объемных изделий

ПН – послойная наплавка

ПС – послойный синтез

САПР – система автоматизированного проектирования

СЛО – синтез локализованными объемами

СЛП – селективное лазерное плавление

СЛС – селективное лазерное спекание

СОИ – синтез объемных изделий

СПО – слияние порошковых оснований

ТФС – твердофазное спекание

УЗК – ультразвуковая консолидация

ЭМИ – электронная модель изделия

ЭПП – электронно-пучковое плавление

3DP – 3 Dimensional Printing techniques

ADM – Advanced Digital Manufacturing

AF – Additive Fabrication Technology

AM – Additive Manufacturing

AMF – Additive Manufacturing File Format

ASTM – American Society for Testing and Materials  
AT – Additive Technology  
BPM – Ballistic Particle Manufacturing  
CAD – computer aided design  
CALs – Continuous Acquisition and Life cycle Support  
CFL – Cubital Facet List  
DCP – Direct Croning Process  
DDM – Direct Digital Manufacturing  
DMD – Direct Metal Deposition  
DSPC – Direct Shell Production Casting  
DTM – Desktop Manufacturing  
EBM – Electron Beam Melting  
FDM – Fused Deposition Modeling  
FFF – Fused Filament Fabrication  
FTI – Film Transfer Imaging  
FWM – Freeze Water Method  
HSS – High Speed Sintering  
IGES – Initial Graphics Exchange Specification  
LENS – Laser Engineering Net Shaping  
LM – Layered Manufacturing  
LMS – Laser Micro Sintering  
LOM – Laminated Object Manufacturing  
LwPBF – Layer-wise Powder Bed Fusion  
MEM – Melted Extrusion Modeling  
MJM – Multi-Jet Modeling  
MJS – Multiphase Jet Solidification  
NLM – Non-Layered Manufacturing  
PBF – Powder Bed Fusion

PBS – Powder-based System  
PLT – Paper lamination Technology  
RepRap – Replicating Rapid Prototyper  
RP&M – Rapid Prototyping and Manufacturing  
RPI – Rensselaer Polytechnic Institute  
SCARA – Selective Compliance Articulated Robot Arm  
SCS – Solid Creation System  
SDM – Shape. Deposition Manufacturing  
SFF – Solid Freeform Fabrication  
SGC – Solid Ground Curing  
SIS – Selective Inhibition of Sintering  
SLA – Stereolithography  
SLP – Sheet Lamination Process  
SLS – Selective laser sintering  
SME – Society of Manufacturing Engineers  
SMS – Selective Mask Sintering  
SOUP – Solid Object Ultraviolet Laser Printer  
STEP – Standard for Exchange of Product model data  
STH – Surface Triangles Hinted  
STL – Stereolithography  
UAM – Ultrasonic Additive Manufacturing  
UC – Ultrasonic Consolidation



*Учебное издание*

БЕЛЯЕВ Леонид Викторович  
АБОРКИН Артемий Витальевич

ВВЕДЕНИЕ В АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Учебное пособие

Редактор А. П. Володина

Технический редактор Ш. Ш. Амирсейидов

Компьютерная верстка Л. В. Макаровой

Корректор Н. В. Пустовойтова

Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Подписано в печать 08.11.23.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 14,42. Тираж 30 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87.